

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Franjo Dominković

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Franjo Dominković

Zagreb, 2016. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivi Garašiću, dipl. ing. te dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing., na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Franjo Dominković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FRANJO DOMINKOVIĆ** Mat. br.: **0035189556**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA MIG POSTUPKA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF MIG PROCESS FOR WIRE ARC ADITIVE MANUFACTURING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu opisati načela WAAM-Wire arc additive manufacturing i to posebno sa zahtjevima procesa za osnovne materijale na bazi aluminijskih legura. Usporediti primjenu aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom sa konvencionalnom strojnom obradom. Dati pregled istraživanja koja se provode na bazi aluminijskih materijala i postupaka aditivne proizvodnje električnim lukom.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati primjenjive parametre MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Kao osnovni materijal upotrijebiti žicu kvalitete AlMg5. Ispitivanje provesti isključivo uz primjenu impulsnih struja i zaštitnog plina argona. Analizirati operativni okvir parametara MIG koji su prikladni za izradu proizvoda sa stanovišta pojave pora i drugih nepravilnosti. Na temelju rezultata donijeti zaključke o prikladnosti dobivenih parametara za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom na osnovi aluminijskih materijala.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS FIZIKALNIH VELIČINA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA – ADDITIVE MANUFACTURING (AM).....	2
2.1 Postupci aditivne proizvodnje s praškom.....	5
2.1.1 Selektivno Lasersko Topljenje engl.Selective Laser Melting (SLM)	6
2.1.2 Lasersko navarivanje.....	7
2.1.3 Arcam EBM	7
2.2 Aditivna proizvodnja sa žicom.....	9
2.2.1 WLAM – Wire + Laser Additive Manufacturing	9
2.2.2 EBF ³ postupak.....	10
3. TEHNOLOGIJE I OPREMA ZA ZAVARIVANJE.....	12
3.1 MIG zavarivanje.....	13
3.2 Izvedbe MIG/MAG postupka.....	18
4. WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)	20
4.1 Općenito o WAAM-u.....	21

4.2 WAAM postupak aluminijskih legura	25
4.2.1 Općenito o aluminiju	25
4.2.2 Legure aluminijskih legura	25
4.2.3 Zavarljivost aluminijskih legura.....	28
4.2.4 Najčešće nepravilnosti pri zavarivanju aluminijskih legura	29
4.2.5 WAAM postupak aluminijskih legura	31
5. WAAM TITANOVIIH LEGURA.....	32
6. USPOREDBA CIJENA TRADICIONALNIH POSTUPAKA SA WAAM-OM	34
7. UPOTREBA WAAM POSTUPKA	37
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	40
8.1 Oprema za WAAM postupak	40
8.1.1 Izvor struje za zavarivanje OTC Welbee P400	41
8.1.2 Bug-O Systems MDS - 1002.....	43
8.1.3 Žica za zavarivanje.....	44
8.1.4 Osnovni materijal EN AW 5083 (AlMg4,5Mn)	44
8.2 Tijek eksperimenta	46
8.3 Ispitivanja uzoraka	55
8.3.1 Priprema uzoraka za ispitivanje	55
8.3.2 Metalografska ispitivanja	55
9. ZAKLJUČAK	68
LITERATURA.....	70

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [2].....	2
Slika 2.	Glavni koraci u aditivnoj proizvodnji [2]	3
Slika 3.	Prikaz aditivnih tehnologija za metale [3]	4
Slika 4.	Shema stroja za selektivno lasersko topljenje [5]	5
Slika 5.	Konstrukcija izrađena SLM postupkom [7].....	6
Slika 6.	EBM postupak [9].....	8
Slika 7.	Komponenta napravljena Arcamovim EBM uređajem [10].....	8
Slika 8.	Oprema za WLAM [11].....	9
Slika 9.	Shematski prikaz postupka i presjek zida izrađenog WLAM postupkom [11]	10
Slika 10.	Oprema za EBF ³ postupak [11].....	11
Slika 11.	Primjer dijela napravljenog sa EBF ³ postupkom [12].....	11
Slika 12.	Prikaz MIG/MAG opreme za zavarivanje [15]	14
Slika 13.	Tipovi prijenosa metala [17]	15
Slika 14.	Mehanizam MIG zavarivanja kratkim spojevima [17]	16
Slika 15.	Impulsni način zavarivanja [13].....	17
Slika 16.	Potrebna oprema za WAAM [23]	21
Slika 17.	Oprema za WAAM titana [24].....	22
Slika 18.	Presjek zida izrađenog WAAM postupkom [23].....	23
Slika 19.	Topljivost vodika u aluminiju [31]	29
Slika 20.	Nepravilnosti pri zavarivanju Al i Al legura [30]	30
Slika 21.	Postolje za slijetanje zrakoplova [35]	36
Slika 22.	Proces izrade kućišta za rakete [35].....	37
Slika 23.	Kućište za rakete nakon završne obrade [35].....	37
Slika 24.	Model krila napravljen WAAM procesom [22].....	38
Slika 25.	Propeler izrađen WAAM procesom [36].....	38
Slika 26.	Kvadratna zatvorena konstrukcija izrađena WAAM postupkom [36].....	39
Slika 27.	Polukružna konstrukcija izrađena WAAM postupkom [36].....	39
Slika 28.	Krilo aviona napravljeno od titanove legure Ti-6Al-4V [36]	39
Slika 29.	Oprema za WAAM postupak.....	40

Slika 30.	Izvor struje za zavarivanje Welbee P400	41
Slika 31.	Bug-O Systems MDS - 1002 uređaj	43
Slika 32.	Plan eksperimenta	46
Slika 33.	Priprema za eksperiment.....	47
Slika 34.	Upravljačka ploča izvora za zavarivanje i izabrani parametri	47
Slika 35.	Mjerenje visine uzorka pomoću visinomjera	48
Slika 36.	Funkcija zavarivanja DC Wave Pulse [37]	50
Slika 37.	Uzorak broj 1 nakon prvog prolaza.....	52
Slika 38.	Uzorak broj 1 nakon šest prolaza	52
Slika 39.	Uzorak broj 2 nakon šest prolaza i četkanja	53
Slika 40.	Uzorak broj 2 nakon 12 prolaza	53
Slika 41.	Uzorak 1 nakon 17 prolaza	54
Slika 42.	Uzorci 2 i 3 nakon 17 prolaza	54
Slika 43.	Makroanaliza uzorka 1	56
Slika 44.	Makroanaliza uzorka 2.....	57
Slika 45.	Makroanaliza uzorka 3.....	57
Slika 46.	Prilaz pozicija za mikrostrukturnu analizu.....	62
Slika 47.	Mikroskop Olympus GX51.....	63
Slika 48.	Mikrostruktura osnovnog materijala EN AW 5083	63

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Mase depozita za razne metale [23]	22
Tablica 2.	Vrste legura aluminija [28]	26
Tablica 3.	Udio materijala u leguri titana [33]	32
Tablica 4.	Mehanička svojstva Ti-6Al-4V [34]	32
Tablica 5.	BTF omjeri za neke zrakoplovne komponente [35]	35
Tablica 6.	Usporedba WAAM procesa sa tradicionalnim procesom [35]	35
Tablica 7.	Cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljena od titana [35]	36
Tablica 8.	Cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljena od čelika [35]	36
Tablica 9.	Karakteristike OTC Welbee P400 izvora struje [37]	42
Tablica 10.	Kemijski sastav žice za zavarivanje [38]	44
Tablica 11.	Kemijski sastav legure EN AW 5083 [39]	45
Tablica 12.	Mehanička svojstva legure EN AW 5083 [39]	45
Tablica 13.	Parametri zavarivanja	49
Tablica 14.	Promjenjivi paramteri korišteni u eksperimentu	50
Tablica 15.	Parametri zavarivanja i dubina uzorka svakog prolaza	51
Tablica 16.	Makroanaliza uzorka 1	58
Tablica 17.	Makroanaliza uzorka 2	59
Tablica 18.	Makroanaliza uzorka 3	60
Tablica 19.	Nepravilnosti na rubovima uzorka	61
Tablica 20.	Mikrostruktura i prosječna veličina uključka u zoni utjecaja topline	65
Tablica 21.	Snimljena mikrostruktura na sredini uzorka	66
Tablica 22.	Snimljena mikrostruktura na vrhu uzorka	67

POPIS KRATICA

WAAM	-	Aditivna proizvodnja žicom potpomognuta električnim lukom (engl. Wire+Arc Additive Manufacturing)
BTF	-	Omjer mase sirovca i gotovog dijela (engl. Buy To Fly)
AM	-	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing)
SLA	-	Stereolitografija (engl. Stereolithography)
CAD	-	Oblikovanje pomoću računala (engl. Computer-aided Design)
SLM	-	Selektivno lasersko topljenje (engl. Selective Laser Melting)
EBM	-	Taljenje elektronskom zrakom (engl. Electron Beam Melting)
WLAM	-	Aditivna proizvodnja žicom potpomognuta laserom (engl. Wire+Laser Additive Manufacturing)
EBF	-	Oblikovanje pomoću elektronskog snopa (engl. Electron Beam Forming)
MIG/MAG	-	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi
TIG	-	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
CMT	-	Vrsta prijenosa metala (engl. Cold Metal Transfer)
CNC	-	Numeričko upravljanje (engl. Computer Numeric Control)
B1	-	Iskoristiva površina
B2	-	Neiskoristiva površina
CMT	-	Način prijenosa metala razvijen od Froniusa (engl. Cold Metal Transfer)
DC	-	Istosmjerna struja (engl. Direct Current)

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Veličina	Opis
V_u	[kg]	Masa dijela prije obrade odvajanjem čestica
V_i	[kg]	Masa dijela nakon obrade odvajanjem čestica
U	[V]	Napon
I	[A]	Struja
f	[Hz]	Frekvencija
R_m	[N/mm ²]	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	Konvencionalna granica razvlačenja
A	[%]	Istezljivost
HB		Tvrdoća po Brinellu

SAŽETAK

Diplomski rad je podijeljen u dva dijela – teorijski i ekperimentalni.

U teorijskom dijelu rada kratko su opisane aditivne tehnologije, opisane su glavne aditivne tehnologije za izradu dijelova od metala. Glavne aditivne tehnologije za izradu dijelova od metala su podijeljene ovisno o tipu dobavljanja materijala – žica ili prah. Detaljnije je prikazan Wire+Arc Additive Manufacturing(WAAM) postupak koji sve više dobiva na važnosti u industrijskoj proizvodnji dijelova od skupljih materijala kao što je titan ili zbog brzine izrade prototipa. Detaljnije je opisan WAAM postupak za aluminij i dani su osnovni podaci o aluminiju i njegovim legurama. Opisan je postupak i parametri za izradu dijelova od titana, preciznije od najčešće titanove legure Ti-6Al-4V. Opisana je kalkulacija cijene za obradu odvajanjem čestica i WAAM i koje uštede je moguće postići upotrebom WAAM postupka. Prikazane su komponente za koje se koristi WAAM postupak kao što je krilo aviona, kućište rakete i druge.

U eksperimentalnom dijelu je opisana procedura nanošenja sloja na sloj WAAM postupkom odnosno MIG zavarivanje sloja na sloj pomoću žice i električnog luka. Prikazan je tijek eksperimenta i korišteni parametri. Eksperimentom su zavarena 3 uzorka sa različitom frekvencijom impulsa - 6 Hz, 9 Hz i 12 Hz. Na uzorcima je nakon zavarivanja izvršena mikroanaliza i makroanaliza. U posljednjem dijelu ovog diplomskog rada doneseni su zaključci na osnovi provedenih ispitivanja.

Ključne riječi: 3D nanošenje metala, WAAM, MIG zavarivanje, aluminij

SUMMARY

This thesis is made from theoretical and experimental part.

The theoretical part of the thesis briefly describes additive technology, it describes the main processes for the production of additive manufactured metal parts. Main additive technologies are divided depending on the supply of materials – wire or powder. Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM) process is described in details because it is the process which is increasingly gaining in importance in the industrial production of parts of more expensive materials such as titanium or rapid prototyping. WAAM process for aluminium and its alloys is shown in details. Parameters and concerns for titanium and its alloy Ti-6Al-4V are shown. The thesis describes the calculation for metal removal and WAAM and which savings is possible to obtained by using WAAM procedure. Various metal components made by WAAM process are shown, like plane wing, missile housing and other.

The experimental part describes the procedure for application of multilayer WAAM process. The course and used parameters in the experiment are shown. 3 samples with different parameters are made in experiment. Every sample has different wave frequency – 6,9,12 Hz. After welding the samples were used in microanalysis and macroanalysis. In the last par of this thesis an analysis is given.

Keywords: 3D printing of metal parts, WAAM, MIG welding, aluminium, titanium

1. UVOD

Tijekom godina potražnja za materijalima kao što su nehrđajući čelici, titan, aluminij i drugi dramatično se povećala, te projekcije za budućnost pokazuju daljni rast. Proizvodnja takvih materijala zahtijeva velike količine energije, te se emitiraju velike količine ekološki neprihvatljivih plinova, prašina i drugih nepovoljnih nusprodukata. Iako se u posljednje vrijeme pokušava maksimalno reducirati količina materijala potrebna za proizvodnju nekog dijela, to i dalje predstavlja veliki problem. Tehnologije iz grupe obrade odvajanjem čestica kao što su glodanje, tokarenje i druge imaju vrlo nepovoljne karakteristike što se tiče odvojenog materijala. Takav materijal ne može se više iskoristiti bez da se prethodno reciklira, te često nije moguće dobiti materijal istih svojstva. Kod obrade deformiranjem problem ne predstavlja odvojeni materijal, nego velika početna investicije i vrijeme potrebno za izradu kalupa. U današnje vrijeme cilj je minimalizirati vrijeme potrebno od ideje do gotovog proizvoda tako da dugotrajno projektiranje ne dolazi u obzir, pogotovo kod pojedinačne proizvodnje.

Taj problem je vidljiv u automobilske, medicinske te posebno u avioindustriji gdje je redukcija mase jedan od glavnih ciljeva. U avioindustriji Buy To Fly (BTF) iznosi čak i oko 20, što znači da je za proizvodnju proizvoda mase 1 kg potrebno iskoristiti 20 kg materijala. Radi smanjenja potrošnje materijala u svijetu su se počele razvijati aditivne tehnologije. Wire+Arc Additive manufacturing (WAAM) je jedna od aditivnih tehnologija s najvećim depozitom materijala, proizvodi dijelove navarivanjem sloja na prethodni sloj pomoću robota s izvorom za zavarivanje i dodavačem žice. Upotrebom WAAM-a BTF omjer je kod nekih proizvoda smanjen na 1,5 što predstavlja veliku uštedu u materijalu, troškovima, kao i s ukupnog ekološkog gledišta.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA – ADDITIVE MANUFACTURING (AM)

Aditivna proizvodnja se kao pojam prvi puta susreće na tržištu 1987. godine kada tvrtka 3D Systems tržištu predstavljaju svoj prvi uređaj za stereolitografiju imena SLA-1. Stereolitografija (engl. Stereolithography - SLA), prvi komercijalno dostupan AM postupak, opisan je pretvorbom kapljevite fotosenzitivne smole u kruto stanje selektivnim izlaganjem smole laserskoj zruci. U ovom procesu CAD model je podijeljen u slojeve, svaki sloj je izložen laserskoj zruci kako bi smola selektivno očvrstnula za svaki poprečni presjek [1].

Kada se prvi puta pojavila na tržištu, aditivna proizvodnja je nazivana „Rapid Prototyping“ i „Generative Manufacturing“.

Aditivna proizvodnja obuhvaća svaki mogući način za dodavanje materijala s ciljem dobivanja trodimenzionalnog dijela. U praksi se to većinom svodi na dodavanje sloja na prethodni sloj, koji je u većini slučajeva iste debljine (slika 1.).

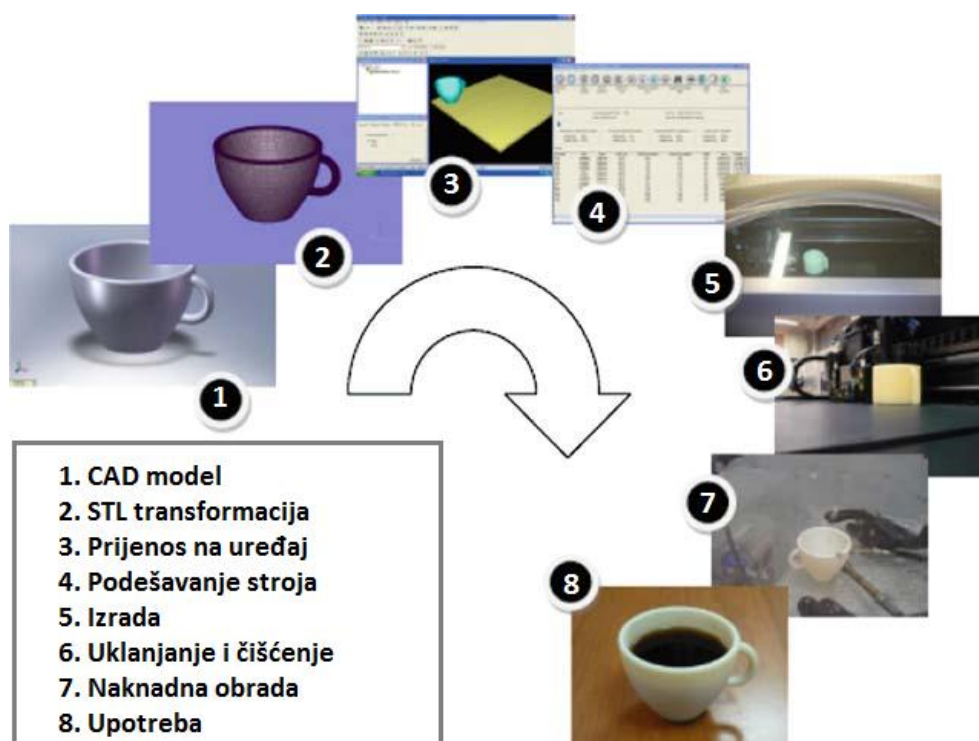


Slika 1. Prikaz slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [2]

Svaki proizvod koji se proizvodi procesom aditivne proizvodnje zahtijeva operatora koji prolazi kroz 8 osnovnih koraka. Kod jednostavnijih strojeva omogućeno je korištenje za širu populaciju s jednostavnijim sučeljem i s bitno smanjenim brojem opcija koje ti strojevi mogu izvršiti. Kod strojeva za industrijsku proizvodnju neophodan je operator s iskustvom kako bi mogao iskoristiti sve opcije koje takvi strojevi nude.

Iskusni operater na stroju prolazi kroz 8 osnovnih koraka u sljedećem redoslijedu [2]:

- Izrada 3D modela u CAD programu,
- Konverzija u STL format,
- Prijenos i manipulacija sa STL datotekom na stroju za aditivnu proizvodnju,
- Podešavanje stroja,
- Izrada,
- Uklanjanje i čišćenje izradka,
- Naknadna obrada izradka,
- Upotreba gotovog proizvoda.

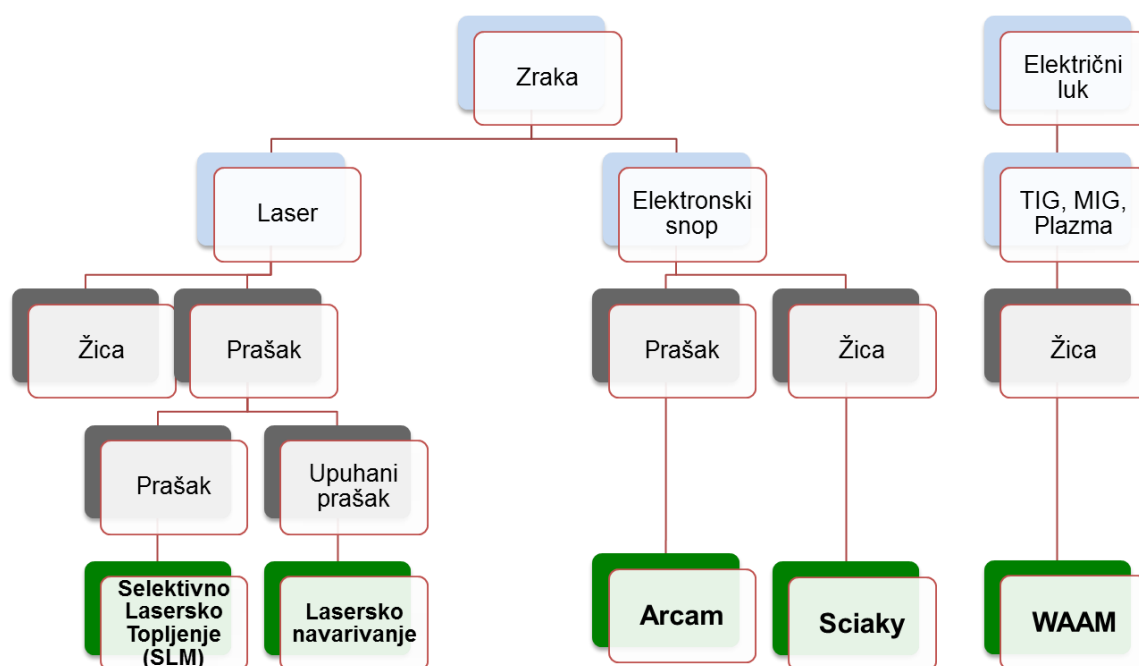


Slika 2. Glavni koraci u aditivnoj proizvodnji [2]

Prvi korak, kao i kod svake druge tehnologije, ideja je koja nam daje predodžbu kako će neki dio funkcionirati i izgledati. U drugim tehnologijama to može biti crtež ili opis riječima, ali kod aditivne proizvodnje to mora biti 3D CAD model. Tek kada je bilo moguće u programu konstruirati određeni dio, postalo je moguće direktno iz njega izraditi izradak. Većina strojeva za aditivnu proizvodnju na tržištu koriste STL format za čitanje CAD modela i njihove geometrije.

STL format uklanja sve prijašnje korake i ostavlja samo aproksimirani model pomoću trokuta. Minimalna veličina trokuta može se podesiti unutar CAD programa te je cilj da njihova veličina bude manja od rezolucije stroja. STL datoteka se šalje u stroj koji je nakon podešavanja parametara, kao što su materijal, visina sloja itd., spreman za izradu. Poslije izrade izradak se čisti i, ukoliko je potrebno, dolazi do naknadne obrade. Posljednji korak je upotreba komponente, bila ona gotov proizvod ili dio neke makete (slika 2.) [2].

Na slici 3. prikazane su aditivne tehnologije za proizvodnju metalnih konstrukcija.



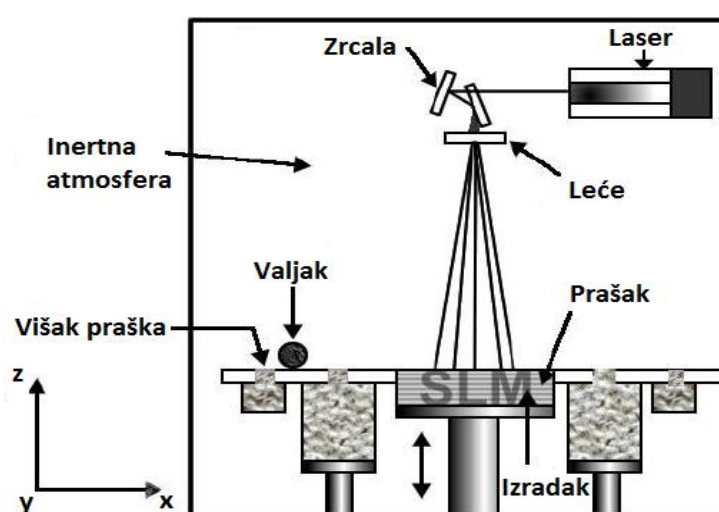
Slika 3. Prikaz aditivnih tehnologija za metale [3]

2.1 Postupci aditivne proizvodnje s praškom

Trenutno najčešći način izrade 3D printanih dijelova je iz praška. Postupak se temelji na izradi CAD modela koji se onda pomoću lasera ili elektronskog snopa izrađuje sloj po sloj iz praškastog materijala. Pomoću ove tehnologije moguće je napraviti male i kompleksne proizvode ili navariti na neku površinu te povećati funkcionalnost ili smanjiti potrebnu masu dijela. Može se koristiti velika paleta materijala kao što su titan, kobalt, nehrđajući čelici i ostali. Komercijalni laserski sustavi imaju najčešće masu depozita od oko 100 g/h. Za proizvodnju je potrebno imati komoru da bi se izbjegla kontaminacija praška. Komore se prije upotrebe moraju predgrijati na potrebnu temperaturu.

Nedostaci postupaka aditivne proizvodnje s praškom [4]:

- Niska količina depozita i ograničena veličina izradka,
- Prašak se lagano kontaminira, potrebno je dobro skladištenje i korištenje kvalitetnog praška,
- Teško recikliranje praška,
- Potrebna naknadna obrada (toplinska i mehanička) da bi se povećala gustoća i mehanička svojstva,
- Visoka početna investicija i skupa oprema (prašak, inertni plin),
- Niska efikasnost lasera, metali reflektiraju zraku,
- Opasnost za zdravlje – laser visoke energije, čestice praška.

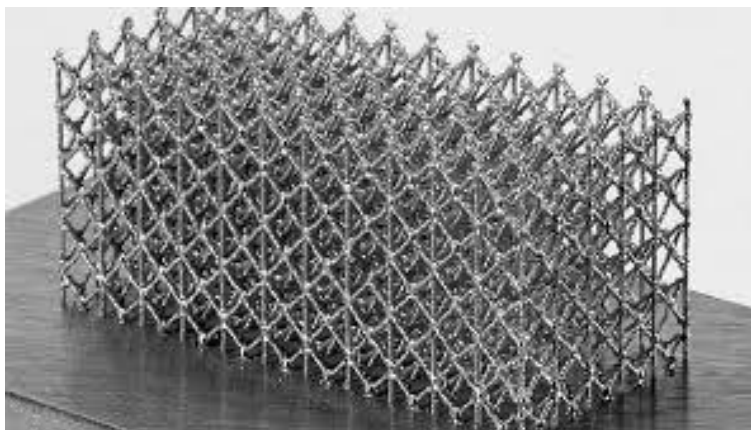


Slika 4. Shema stroja za selektivno lasersko topljenje [5]

Na slici 4. prikazan je stroj za selektivno lasersko topljenje. Kao što se vidi na slici, sve se nalazi u komori koja je ispunjena inertnim plinom, najčešće argonom, radni stol ima mogućnost vertikalnog pomicanja, valjak služi za raspodjelu praška nakon svakoga sloja. Nakon svakog sloja radni stol se pomakne za korak prema dolje, a spremnik s praškom prema gore, nakon toga valjak odvodi prašak iz spremnika i ravna ga na radnom stolu za idući sloj.

2.1.1 Selektivno Lasersko Topljenje engl. Selective Laser Melting (SLM)

SLM proces počinje s podjelom 3D modela u slojeve, za svaki sloj se računa putanja lasera. Svaki se sloj onda proizvodi tako da laser tali prašak i stvara konture dijela sloj po sloj. SLM se koristi za industrijske svrhe za izradu prilagodivih dijelova sa kratkim vremenom od ideje do izrade. Proces se koristi za izradu konstrukcija koje nije moguće napraviti ni sa jednim drugim procesom, kao što su konstrukcije s velikom površinom, ali malim volumenom idealnim za izmjenjivače topline [6]. Na slici 5. prikazana je konstrukcija izrađena SLM postupkom.



Slika 5. Konstrukcija izrađena SLM postupkom [7]

Prednosti SLM-a [6]:

- Ušteda materijala,
- Kompleksna geometrija,
- Odličan BTF omjer,
- Dobra mehanička svojstva.

2.1.2 Lasersko navarivanje

Lasersko navarivanje koristi prašak za reparaciju i poboljšanje površine metalnih materijala. Prašak, laserska zraka i zaštitni plin se istovremeno dostavljaju kroz pištolj te stvaraju taljevinu kojom se postiže spajanje osnovnog materijala sa dodatnim u vidu praška. Lasersko navarivanje koristi se za reparaturno zavarivanje širokog spektra alata i oštećenih strojnih dijelova. Moguće je navarivanje na tanke limove debljine 0.5 mm kako bi se uštedjelo na materijalu (konvencionalnim postupcima ta debljina trebala bi iznositi minimalno ~ 1 mm, kako ne bi došlo do deformacija i oštećenja materijala). Zavaruju se lopatice turbine kod kojih se javlja problem kontinuirane promjene parametra tijekom navarivanja zbog povećanja debljine [1].

Glavni nedostatak lasera je i dalje njegova cijena koja je i do deset puta veća u odnosu na elektrolučne postupke iste snage. Potrebno je poznavati specifikacije i sposobnost lasera za zavarivanje pojedinih materijala kako bi se eliminirale greške kod zavarivanja i postigli zavari željenog oblika i mehaničkih svojstva. Potrebni su visoki zahtjevi za točnost i precizno pozicioniranje glave lasera u odnosu na radni komad jer je promjer žarišne točke malen, a brzina zavarivanja velika.

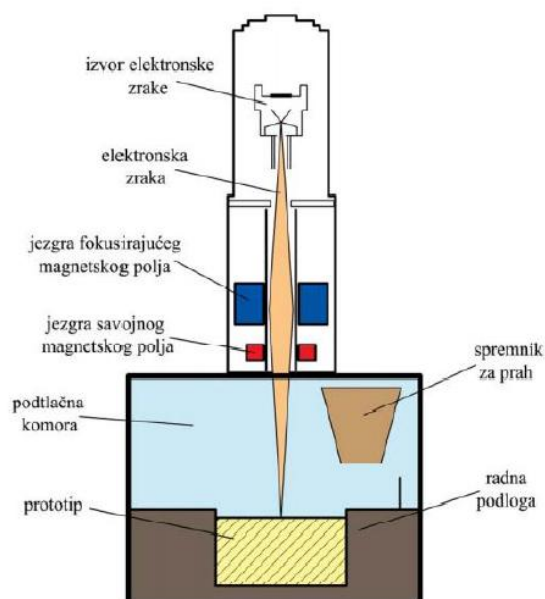
Prednosti laserskog navarivanja [8]:

- Smanjenje korozije osnovnog materijala,
- Duži vijek trajanja,
- Smanjen unos topline,
- Visoka količina depozita,
- Mnogi materijali se mogu navariti ovim postupkom.

2.1.3 Arcam EBM

Arcam proces koristi elektronski snop za unos energije s kojom se tali prašak, proces ima visoku produktivnost. Proces se provodi u vakuumu na visokim temperaturama. Kako bi proces bio uspješan, potrebna je čista i kontrolirana atmosfera. Dobivena konstrukcija ima odlična mehanička svojstva, bez zaostalih naprezanja i bez martenzitne mikrostrukture [1].

Na slici 6. prikazan je EBM postupak sa svojim glavnim dijelovima, dok je na slici 7. prikazana komponenta napravljena Arcamovim EBM postupkom.



Slika 6. EBM postupak [9]

Karakteristike postupka: [8]

- Visoka iskoristivost energije,
- Visoka temperatura izgradnje,
- Sposobnost da se postigne velika snaga,
- Niski troškovi rada,
- Kvaliteta taljenja uklanja nečistoće.



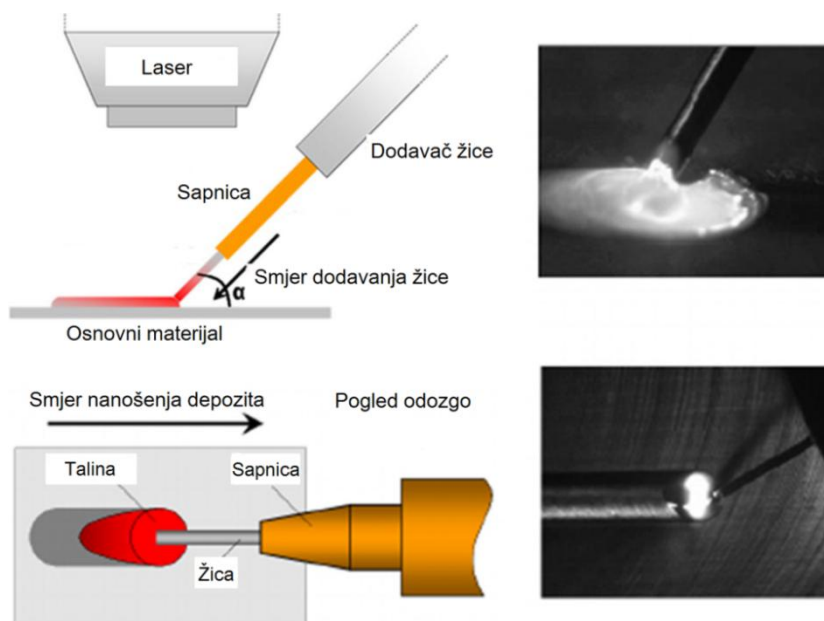
Slika 7. Komponenta napravljena Arcamovim EBM uređajem [10]

2.2 Aditivna proizvodnja sa žicom

2.2.1 WLAM – Wire + Laser Additive Manufacturing

Wire+Laser Additive Manufacturing je proces aditivne proizvodnje u kojem se koristi laser kao izvor topline i žica kao aditivni materijal za proizvodnju metalnih dijelova. Kao oprema za WLAM najčešće se koriste laser, automatski dodavač žice, robot i dodatna oprema kao što je oprema za dostavu zaštitnog plina, oprema za predgrijavanje ili hlađenje. Postupak se temelji na stvaranju taline pomoću lasera na osnovnom materijalu u koji se potom dostavlja žica koja je u dodiru s talinom tali i tvori vezu s osnovnim materijalom. Da bi se talina kretala te kako bi bila moguća izrada raznih struktura potrebno je lasersku glavu i dodavač žice montirati na robota. Ovisno o snazi lasera određena je brzina dovođenja žice, ukoliko je brzina dovođenja žice prevelika, a snaga lasera nedovoljna dolazi do djelomičnog taljenja žice te do naljepljivanja i neadekvatnih svojstava [11].

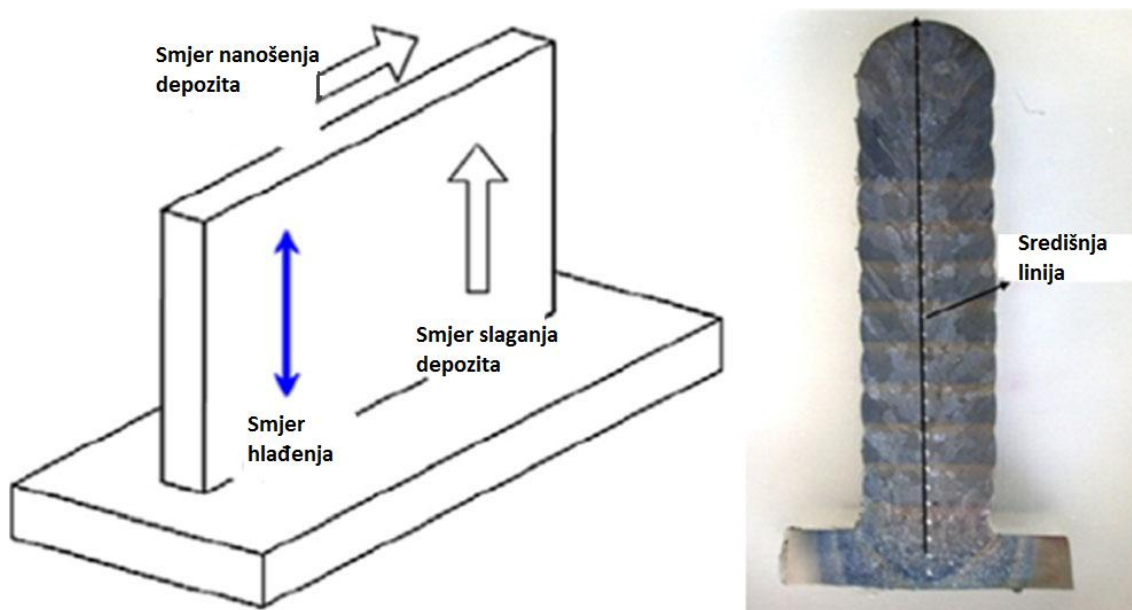
Na slici 8. prikazan je postupak WLAM iz dvije projekcije, gdje se vidi osnovna oprema, smjer nanošenja depozita i smjer dodavanja žice. Tijekom nanošenja depozita kvaliteta depozita i prijenos kapljice tijekom postupka ovise o smjeru dodavanja žice. Ovisno o vrsti materijala smjer dodavanja žice može biti prednji - gdje žica prethodi laserskoj zruci, stražnji – gdje žica prati lasersku zraku i bočni – gdje je dodavač žice sa strane te dodaje žicu bočno. Na slici 8. prikazan je prednji smjer dodavanja žice.



Slika 8. Oprema za WLAM [11]

WLAM postupak je pogodan za razne metalne legure kao što su legure na bazi željeza, legure titana i aluminijske legure. Najčešće se koriste titanove legure zbog njihove visoke cijene i česte upotrebe u zrakoplovnoj industriji. WLAM postupak s odgovarajućim parametrima sposoban je proizvesti razne metalne konstrukcije bez pora i pukotina, te sa sličnim mehaničkim svojstvima kao kod drugih tehnologija kao što su lijevanje i kovanje.

Na slici 9. prikazan je shematski prikaz WLAM postupka, označeni su smjer nanošenja depozita, smjer slaganja slojeva i smjer hlađenja. Na desnom dijelu prikazan je presjek zida dobivenog WLAM postupkom, na kojem se vide granice prolaza i označena je središnja linija.

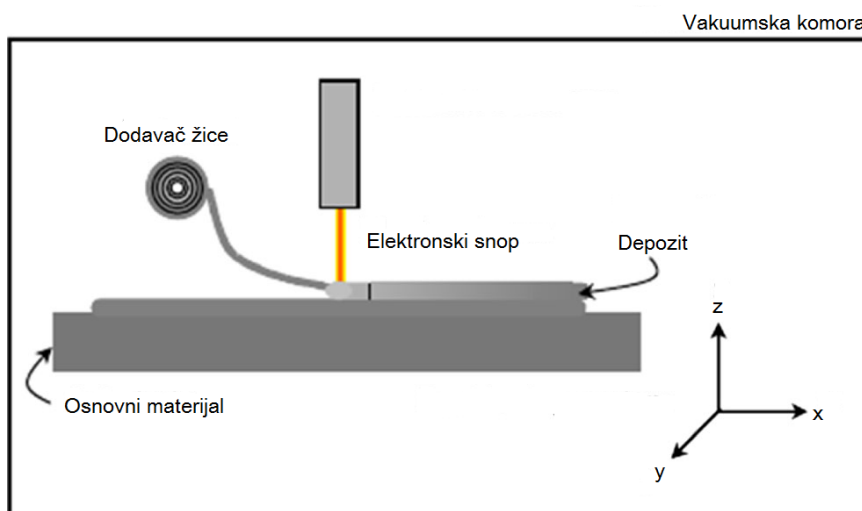


Slika 9. Shematski prikaz WLAM postupka i presjek zida izrađenog WLAM postupkom [11]

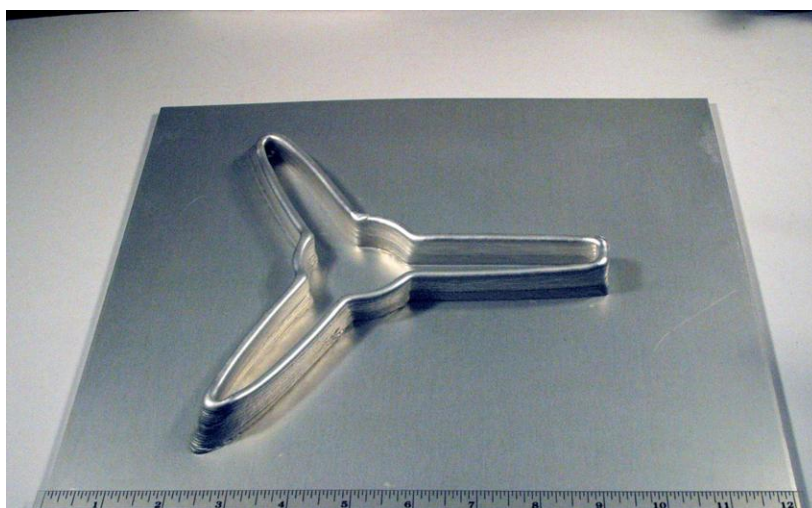
2.2.2 EBF³ postupak

EBF³ postupak je postupak koji je patentirala NASA za izradu kompleksnih, preciznih dijelova na Zemlji, Marsu ili svemirskoj postaji. EBF³ postupak koristi elektronski snop u vakuumskoj atmosferi za stvaranje taline na metalnom osnovnom materijalu u koju se dovodi žica. Postupak se može primijeniti direktno iz CAD modela te je pogodan za sve metale koji provode električnu struju, čak i za visoko reflektivne metale kao što su aluminij i bakar.

Kvaliteta izradka ovisi isključivo o promjeru žice, ako se želi napraviti precizniji izradak s tanjim stijenkama koristi se tanja žica, a za veće izradke i veći depozit koristi se žica većeg promjera. Na slici 10. prikazana je shema stroja za EBF³ postupak, a na slici 11. prikazana je metalna konstrukcija napravljena pomoću EBF³ postupka [11].



Slika 10. Oprema za EBF³ postupak [11]



Slika 11. Primjer dijela napravljenog sa EBF³ postupkom [12]

3. TEHNOLOGIJE I OPREMA ZA ZAVARIVANJE

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj (zavareni spoj bez grešaka sa zahtijevanim mehaničkim i ostalim svojstvima) [13].

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom ima sve širu primjenu i sve se više koristi za mnoge zahtjeve zbog svoje svestranosti. Danas su postupci iz ove grupe procesa jedni od najkorištenijih postupaka u zavarivačkoj industriji koji svoj primat mogu zahvaliti mnogobrojnim prednostima te nerijetko zamjenjuju ostale postupke. Mogu se koristiti za zavarivanje većine komercijalnih metala i legura u svim pozicijama, imaju velike brzine zavarivanja i stope depozita, imaju jako dobru zaštitu metala zavara, mogućnost robotizacije, visoka svojstva zavara zbog kontinuiranosti procesa itd.

Zavarivanje je interdisciplinarna tehnologija. Za razumijevanje i korištenje ove tehnologije nužna su znanja s područja:

- Znanosti o materijalima i metalurgije (metalurgija zavarivanja),
- Termodinamike (temperaturna polja pri zavarivanju),
- Elektrotehnike (izvori struje, električni luk, spajanje različitih senzori – U, I, zvuk, svjetlost,...),
- Kemije (metalurški i drugi procesi koji se odvijaju pri zavarivanju),
- Informatike (ekspertni sustavi, različiti proračuni, baze podataka, ...) i dr.

3.1 MIG zavarivanje

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova spada u postupke zavarivanja taljenjem. Postupak MIG (engl. Metal Inert Gas) zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova (argon ili helij). Prilikom zavarivanja koristi se kontinuirano dodavanje žice koja služi kao elektroda i kao dodatni materijal. Metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale se pomoću topline električnog luka. Prednosti postupka su velike brzine zavarivanja, izvrsno čišćenje oksidnog sloja tijekom zavarivanja, te mogućnost zavarivanja u svim položajima. Postupak može biti automatski, poluautomatski i robotiziran.

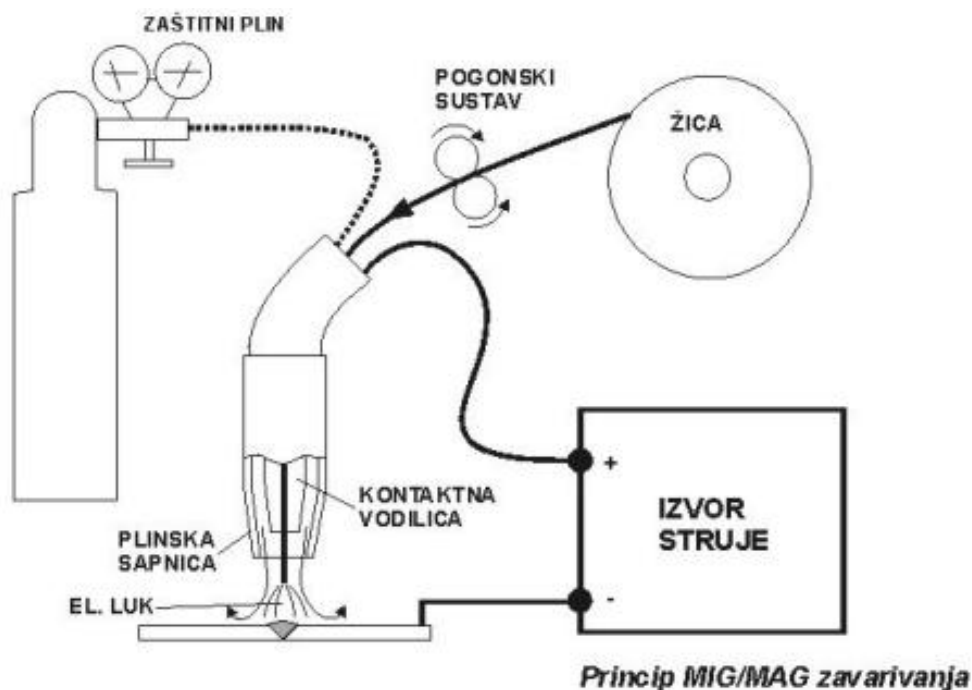
Prednosti MIG postupka [14]:

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- Zavarivanje u svim položajima, moguće zavarivanje u radionici i na terenu,
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina i praškom punjene žice,
- Široki raspon debljina,
- Velika učinkovitost i proizvodnost,
- Pogodan za automatizaciju,
- Moguća primjena i za lemljenje.

Nedostatci MIG postupka [14]:

- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite – vjetar,
- Problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij),
- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom),
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija).

Na slici 12. grafički je prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja. Prikazan je pištolj za zavarivanje u koji se dovodi žica preko pogonskog sustava kotačića, izvor struje za zavarivanje i zaštitni plin.



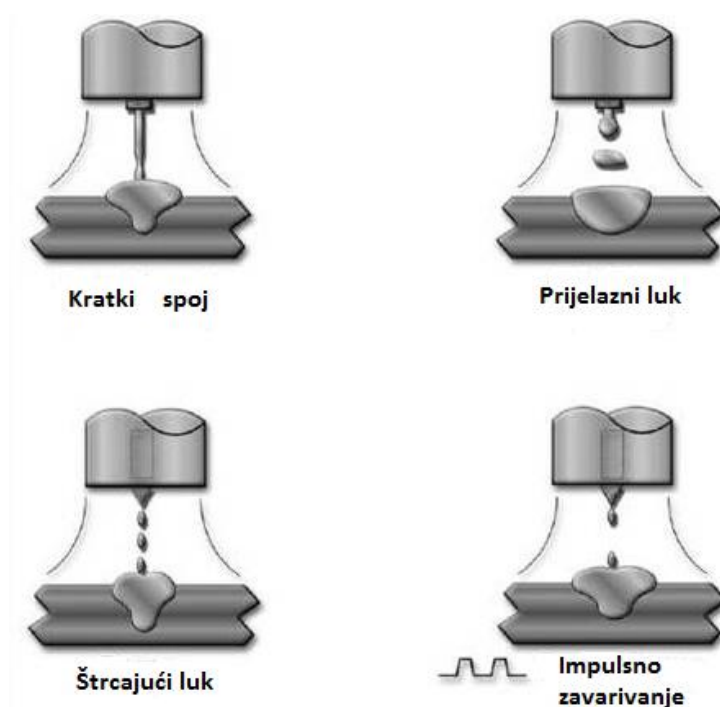
Slika 12. Prikaz MIG/MAG opreme za zavarivanje [15]

Parametri pri zavarivanju MIG postupkom ovise o debljini materijala, tehnološkim zahtjevima, opremi, uvjetima u kojima se zavaruje, stupnju mehanizacije, iskustvu operatera te ostalim faktorima koji se mogu pojaviti.

Osnovni parametri koje treba uzimati u obzir kod MIG zavarivanja su sljedeći [14]:

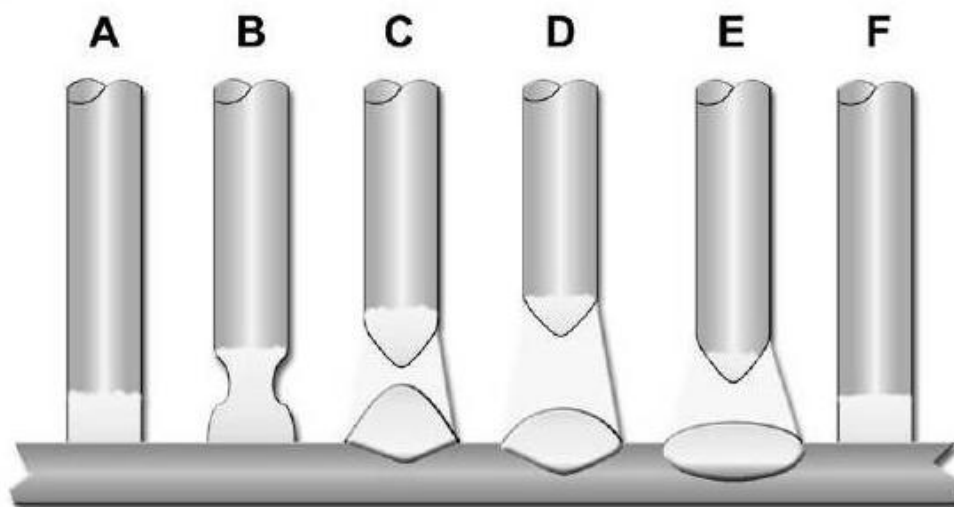
- Struja zavarivanja (definirana brzinom i promjerom žice, utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena),
- Promjer žice (veći promjer žice zahtijeva veću struju),
- Napon električnog luka (utječe na način prijenosa metala te protaljivanje, širinu i izgled zavara),
- Brzina zavarivanja (količina unesene topline, produktivnost),
- Protok zaštitnog plina,
- Dužina slobodnog kraja žice,
- Induktivitet.

Pri zavarivanju MIG postupkom način prijenosa metala električnim lukom ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu žice te karakteristikama izvora struje zavarivanja. Ovisno o parametrima kod MIG zavarivanja prijenos metala može se odvijati na četiri načina: kratkim spojevima, prijelazni (miješani) luk, štrcajući luk i impulsno zavarivanje (slika 13.) [16].



Slika 13. Tipovi prijenosa metala [17]

Kod prijenosa metala kratkim lukom zavarivanje se izvodi kratkim spojem. Prilikom zavarivanja na vrhu slobodnog kraja žice stvara se rastaljena metalna kapljica koja se postepeno povećava. Zbog male duljine luka metalna kapljica u određenom trenutku dodirne rastaljeni metal. Tada nastaje kratki spoj, električni se luk kratkotrajno prekida, a napon pada na nulu. Struja zavarivanja koja u istom trenutku naglo poraste pomaže otkidanju kapljice s vrha elektrode. Nakon otkidanja kapi ponovno se uspostavlja električni luk i ciklus se ponavlja (slika 14.). U jednoj sekundi ponavlja se 100 – 200 ciklusa. Zbog male količine rastaljenog metala ovakav način zavarivanja pogodan je za zavarivanje tankih limova, korijenskog zvara, kao i za zavarivanje u prisilnim položajima [16].



Slika 14. Mehanizam MIG zavarivanja kratkim spojevima [17]

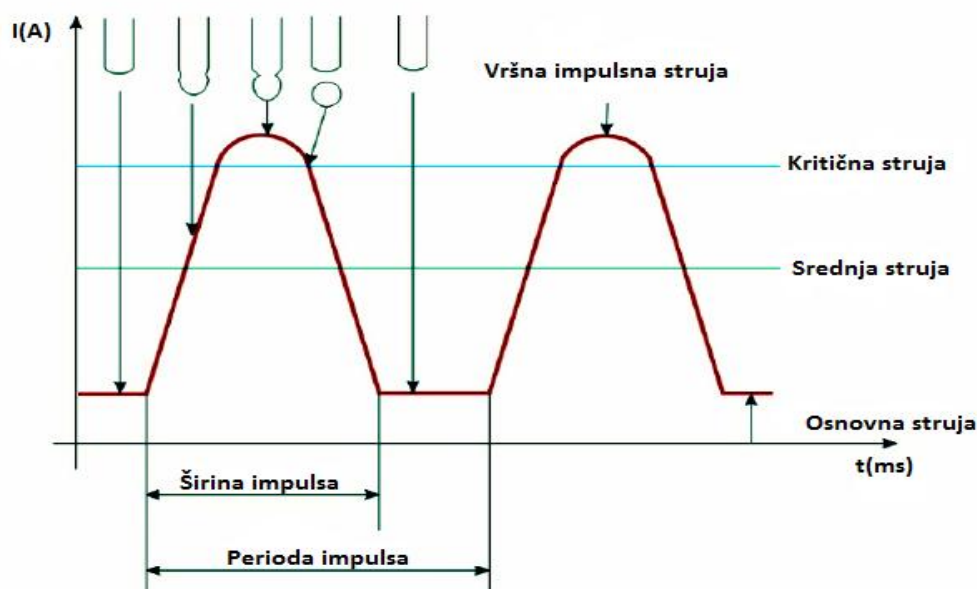
Prijenos metala mješovitim ili prijelaznim lukom postiže se pri naponima 22 – 25 V i struji zavarivanja 170 – 235 A. Metal se prenosi djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk kao pri zavarivanju štrcajućim lukom. Nedostatak prijenosa metala mješovitim lukom je neregularnost pojave kratkih spojeva, iz tog razloga se ovaj prijenos izbjegava.

Prijenos metala štrcajućim lukom karakteriziraju visoki naponi i jake struje zavarivanja pri čemu dolazi do snažnog „pinch-efekta“ koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje idu u talinu. Zbog brzog prijelaza kapi vrijeme zagrijavanja kapi na vrhu elektrode je kratko, što skraćuje vrijeme trajanja metalurških reakcija. Štrcajući luk karakterizira prijenos sitnih metalnih kapljica u mlazu slobodnim letom bez kratkih spojeva (niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom, sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeravaju ih prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad), uz stalno održavanje električnog luka. Budući da je gustoća struje veća od 300 A/mm², postiže se visok učinak taljenja i ekonomičnost. Nedostatak prijenosa metala štrcajućim lukom je opasnost od prokapljivanja kod tanjih materijala i u prisilnim položajima, odnosno dolazi do cijedenja velike količine rastaljenog materijala zbog djelovanja gravitacijske sile [16].

Impulsni luk primjenjuje se najčešće u zaštiti argona ili u mješavinama bogatim s argonom. Ovaj oblik prijenosa kapljica metala u luku pruža mogućnost dobrog zavarivanja aluminija, bakra i CrNi čelika. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, a kap se otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom (slika 15.). Na taj se način dobro i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, te izvodi zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvenciju i trajanje impulsa moguće je podešavati. Pri prijenosu kapi ne dolazi do kratkih spojeva. Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature metalne kapi, pa se može upravljati smjerom prijenosa metala.

Glavne prednosti impulsnog prijenosa metala su:

- Povoljniji prijenos materijala – gladak zavar i ujednačeniji kemijsko-metalurški sastav,
- Manje štrcanja – niži troškovi čišćenja,
- stabilan luk i kod manjih jakosti struje – manji unos topline,
- široko područje struje zavarivanja za pojedine promjere žice,
- mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijale,
- primjenjivost u svim položajima zavarivanja.



Slika 15. Impulsni način zavarivanja [13]

3.2 Izvedbe MIG/MAG postupka

CMT (engl. Cold Metal Transfer) je prijenos materijala razvijen i patentiran od tvrtke Fronius. CMT je kratica za hladni prijenos metala te predstavlja modificirani prijenos materijala kratkim spojevima u kojem je unos topline manji od konvencionalnih postupaka MIG zavarivanja. Postupak se temelji na oscilatornom gibanju žice. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice, a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja [18].

Prednosti CMT postupka su:

- Mali unos topline,
- Bez štrcanja,
- Naknadna obrada površine nakon zavarivanja nije potrebna,
- Kontrolirano i točno upravljanje duljinom električnog luka.

STT (Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja razvijen je u tvrtki Lincoln Electric. Predstavlja suvremeni i učinkoviti postupak zavarivanja koji se najčešće koristi za zavarivanje korijena zavora u otvorenom žlijebu (u jednom prolazu), i to najčešće cijevnih elemenata u prehrambenoj, procesnoj i automobilske industriji. STT postupak zavarivanja temelji se na prijenosu materijala kratkim spojevima, a samo odvajanje kapljice obavlja mehanizam površinske napetosti (Surface Tension Transfer). Izvor struje, uz vrlo čestu i preciznu kontrolu struje zavarivanja, daje maksimum jakosti u trenutku kada je za prijenos metala dovoljan samo mehanizam površinske napetosti. Na taj se način izbjegava rasprskavanje kapljice metala u prijenosu i daljnji nepotreban unos topline, što bi bila posljedica povećanja jakosti struje u kratkom spoju kao što je to kod klasičnog MIG/MAG zavarivanja [19].

FastROOT postupak zavarivanja razvijen je u tvrtki Kemppi, a temelji se na digitalnom upravljanju osnovnih parametara zavarivanja – struji i naponu. Modifikacijom kratkih spojeva dobivenih digitalnim upravljanjem parametara dobiva se postupak zavarivanja pogodan za zavarivanje tankih limova kao i zavarivanje korijenskih prolaza uz veću brzinu i produktivnost s obzirom na TIG zavarivanje [19].

HC-Heat Controled MAG modificiran je postupak zavarivanja kratkim spojevima u rasponu do 200 A pri čemu se distribucijom pozitivnog i negativnog polariteta na žici može precizno upravljati količinom rastaljenog metala i penetracijom upravo zbog načela fizikalnih procesa pri zavarivanju izmjeničnom strujom [20].

RMT (Rapid MIG/MAG Technology), razvijen u tvrtki ESS Schweisstechnik, je postupak koji se temelji na štrcajućem luku (štrcajućem prijenosu metala), ovaj je postupak iznimno pogodan za zavarivanje debljih pozicija, a kutni zavareni spojevi debljine do 8 mm mogu se zavarivati bez posebne pripreme spoja. RMT tehnologija teži skraćivanju električnog luka, pri čemu dolazi do pada napona i povećanja koncentracije unesene energije [20].

ForceArc, razvijen u tvrtki EWM je modificirani način prijenosa štrcajućim lukom, pri relativno nižoj duljini luka u odnosu na konvencionalni štrcajući luk, s mehanizmom izbjegavanja rastaljenog materijala. Struja zavarivanja se smanjuje vrlo brzo nakon ponovne uspostave električnog luka, dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. To znatno smanjuje vrijeme kratkog spoja i reducira štrcanje kapljica na minimum [20].

4. WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)

U današnje vrijeme moderne industrijske grane, kao što su automobilska, zrakoplovna i medicinska, kontinuirano traže načine za izradu velikih i relativno kompleksnih metalnih dijelova s točnim dimenzijama, dobrim mehaničkim svojstvima koji odmah mogu biti korišteni u sadašnjim sistemima. Prednosti WAAM tehnologije dolaze do izražaja kada se koristi za proizvodnju dijelova od metala koji imaju visoku cijenu kao što su titan, nikal, aluminijske legure, te nehrđajućih čelika.

Glavni smjerovi za industrijsku proizvodnju u budućnosti [23]:

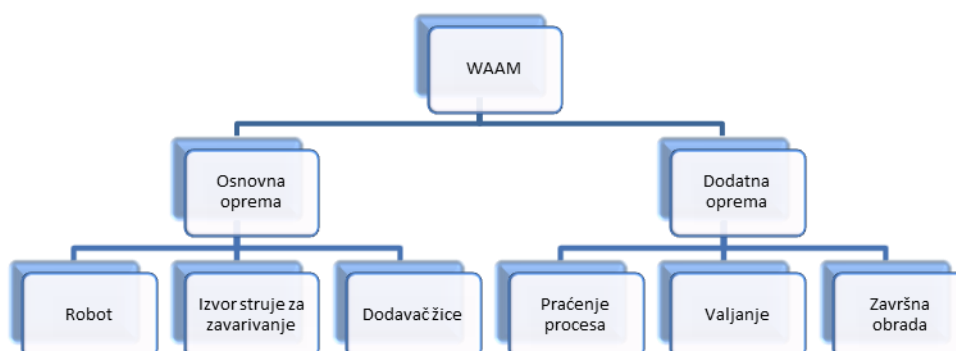
1. Skraćeno vrijeme od ideje do gotovog proizvoda – kada se novi inovativni proizvod pušta u prodaju podiže se reputacija tvrtke, zauzima se vodeće mjesto na tržištu i profit je veći.
2. Više varijacija – proizvodi postaju svestrani te se traži mogućnost naknadne nadogradnje na osnovni model i višu prilagodljivost kupcu.
3. Pojedinačna proizvodnja – smanjuje se količina proizvedenih proizvoda zato što na tržištu djeluje mnogo globalnih prodavača, smanjuje se životni vijek proizvoda i proizvodi su pouzdani, razne varijacije na proizvod imaju svoj udio na tržištu.
4. Niža cijena proizvoda – cijena proizvoda predstavlja glavni faktor pri kupnji, kupac više nije ograničen na regiju, nego je moguće poslovati s cijelim svijetom.

Prednosti WAAM tehnologije naspram ostalih tradicionalnih tehnologija:

- Minimum škarta,
- Proizvodnja bez alata,
- Skraćeno vrijeme proizvodnje,
- Isplativa proizvodnja manjih serija proizvoda,
- Ekološki bolja od tradicionalnih tehnologija.

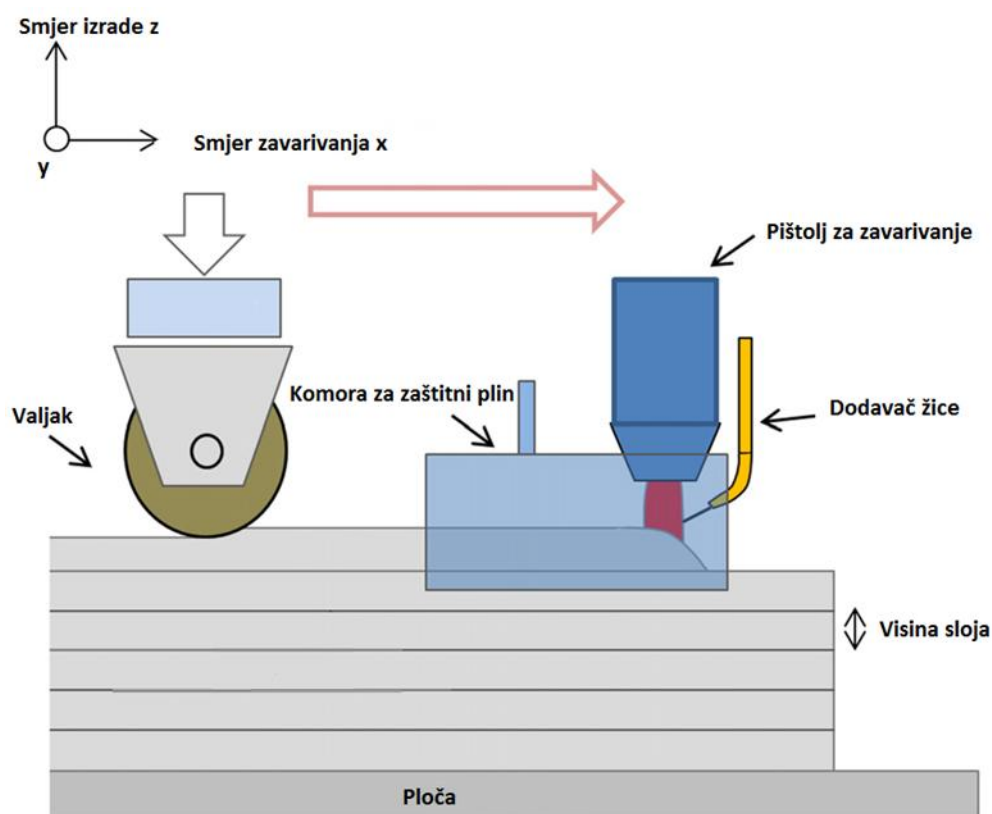
4.1 Općenito o WAAM-u

Proizvodnja velikih dijelova, masa čak do 10 kg, moguća je pomoću Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM). Ova tehnologija koristi izvor struje za zavarivanje, dodavač žice i robota koji se koriste i za ostale vrste zavarivanja, tako da nije potrebno kupovati opremu predviđenu samo za WAAM, nego je moguće s postojećom opremom ili s relativno malom investicijom započeti proizvodnju. Za manipulaciju izvorom i dodavačem žice može se koristiti robot (područje djelovanja ovisno mu je o broju osi) ili modificirani CNC stroj za neku drugu tehnologiju kao što su tokarenje ili zavarivanje iskrenjem. Bez završne obrade odvajanjem čestica ova tehnologija trenutno ne može izraditi funkcionalan dio, zato što tijekom navarivanja dolazi do valovitosti koju je potrebno ukloniti. Za materijale kao što su titan i aluminij koristi se valjanje kako bi se smanjila zaostala naprezanja i postigla tražena mikrostruktura [22]. Na slici 16. prikazana je osnovna i dodatna oprema za WAAM.



Slika 16. Potrebna oprema za WAAM [23]

WAAM koristi električni luk kao izvor topline pomoću kojega se tali žica, žica se dovodi pomoću standardnog dodavača žice na željeno mjesto. Pomicanje električnog luka i dodavača žice izvedeno je pomoću robota ili CNC portalnog stroja. Za izvor za zavarivanje najčešće se koristi impulsni MIG izvor (MIG-P), CMT(Cold Metal Transfer) i TIG izvor ovisno o materijalu i masi depozita po satu.



Slika 17. Oprema za WAAM titana [24]

Na slici 17. prikazana je osnovna i dodatna oprema za WAAM postupak. Sastoji se od opreme kao i za ostale materijale kao što su pištolj za zavarivanje, izvor struje za zavarivanje, dodavača žice i dodatne opreme kao što je komora ili šator za postizanje inertne atmosfere i valjka za mehaničku deformaciju pomoću kojeg se postižu bolja svojstva.

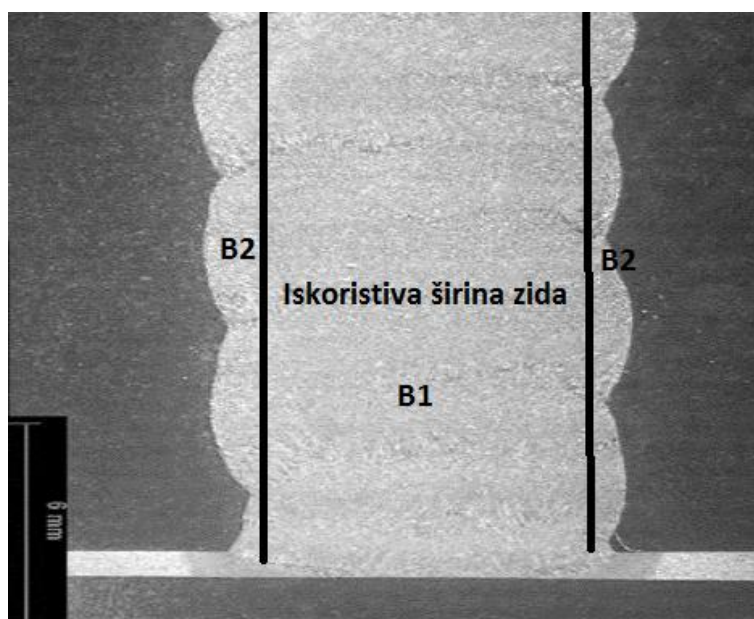
U tablici 1. dan je prikaz mase depozita po satu (kg/h) za grupe korištenih materijala, ovisno o opremi i materijalu moguće je postići i više mase depozita po satu.

Tablica 1. Mase depozita za razne metale [23]

	Čelici	Aluminij	Titan
Masa depozita po satu, kg/h	< 4	< 1	< 1

Prednosti WAAM-a naspram ostalih aditivnih tehnologija:

- Visoki depozit,
- Relativno mala investicija,
- Ušteda materijala,
- Korištenje velikog broja materijala,
- Smanjeno vrijeme proizvodnje.



Slika 18. Presjek zida izrađenog WAAM postupkom [23]

Na slici 18. vidljiv je zid napravljen WAAM postupkom. Kao što se vidi sa slike 18., poslije WAAM postupka potrebna je naknadna obrada odvajanjem čestica da bi se dobila površina bez valovitosti pogodna za industrijsku upotrebu.

Moguće je izračunati efikasnost nanošenja depozita ako izračunamo iskoristivu površinu (B1) i površinu koja se uklanja naknadnom obradom (B2). Iz efikasnosti nanošenja depozita može se procijeniti da li je postupak optimalan ili je potrebno promijeniti parametre zavarivanja za postizanje manjih količina materijala koji mora biti uklonjen [23].

$$\text{Efikasnost nanošenja depozita} = \frac{B1}{B1 + B2}, \% \quad (1)$$

WAAM se zbog svojih pogodnih prednosti koristi za srednje do velike dijelove, ali s manjom kompleksnosti. Trenutno se u proizvodnji koriste aluminij i njegove legure, bakar, titan (Ti-6Al-4V) i čelici. U tradicionalnim industrijama od ideje do gotovog proizvoda prođe ponekad i par mjeseci, dok kod WAAM-a nije potrebno dugo planiranje, nego se praktički iz CAD modela može početi proizvoditi. Ovakva tehnologija s trenutnim postavkama nije pogodna za veću proizvodnju. Glavna prednost WAAM-a je Buy To Fly (BTF) omjer (koliko je potrebno pribaviti materijala da bi se od njega napravio traženi dio) kod skupljih materijala kao što je titan te kombiniranje više vrsta materijala.

Nedostatci WAAM-a [22]:

- Visoka zaostala naprezanja – smanjuju mehanička svojstva materijala,
- Nedostatak iskustva sa ovakvom tehnologijom,
- Teško praćenje parametara zavarivanja,
- Samo jednostavne konstrukcije,
- Deformacije dijelova – poteškoće u postizanju zadanih tolerancija,
- Potrebna naknadna obrada,
- Nedostatak iskustva sa nerazornim ispitivanjima ovakvim konstrukcijama.

4.2 WAAM postupak aluminija i aluminijevih legura

4.2.1 Općenito o aluminiju

Aluminij je laki metal, nakon kisika i silicija najrašireniji element u Zemljinoj kori (8%), u prirodi ga nije moguće pronaći u čistom stanju nego ga je potrebno dobiti iz rude boksita. Aluminij je postojan u vodi i na zraku, te u aeriranim elektrolitima kojima je pH vrijednost između 4 i 9, otapa se u mineralnim kiselinama i u lužinama, ukoliko dođe do dodira sa živom dolazi do razaranja pasivnog sloja koji se ne obnavlja ni nakon odstranjivanja žive, dobro vodi toplinu i električnu struju. Aluminij i njegove legure koriste se kada je potrebna kombinacija svojstava koja on nudi, kao što su dobra mehanička svojstva - povoljan omjer čvrstoće i gustoće, dobra toplinska vodljivost, mala specifična težina i odlična korozijska postojanost [25].

Legiranjem i precipitacijskim očvršnućem mogu se proizvesti legure koje imaju čvrstoću većine čelika, glavni legirni elementi za postizanje veće čvrstoće i tvrdoće su bakar, magnezij, silicij, mangan, krom i cink. Legiranjem se smanjuje njegova otpornost na koroziju, ali bitno poboljšava njegova mehanička svojstva [26]

4.2.2 Legure aluminija

U tablici 2. prikazane su legure aluminija s obzirom na način očvršnuća – toplinski neočvrstive i toplinski očvrstive. Prikazane su osnovne grupe (1000, 2000, 3000...) i njihovi legirni elementi te najčešće korištene legure u industriji. Navedene su osnovne karakteristike za svaku seriju i za što se najčešće primjenjuju.

Tablica 2. Vrste legura aluminija [28]

Legura	Serijski	Tip		Karakteristike
Toplinski neočvrstive legure		Internacionalne oznake		
	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080	Lako se zavaruje, najniža čvrstoća od svih legura aluminija Spremnici u kemijskoj industriji, cjevovodi, folije
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105	Udio mangana do 1,5%, povišuje čvrstoću, ali ne ruši značajno duktilnost i korozijsku postojanost Kuhinjsko posuđe, radijatori...
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182	Najviša čvrstoća od toplinski neočvrstivih legura, odlična zavarljivost Tankovi za kemikalije, posude pod tlakom
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219	Sadrži 2% - 10% bakra, optimalna svojstva se postižu žarenjem, visoka čvrstoća Slabija zavarljivost - tople pukotine Vijci, zakovice, dijelovi zrakoplova
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351	Automobilska industrija, cjevovodi, rešetkaste konstrukcije, ekstrudirani proizvodi Mala sklonost toplim pukotinama
	7000	Al-Zn-Mg	7020 7021 7039	Najčvršća toplinski obradiva legura Loša zavarljivost ukoliko je bakar značajnije zastupljen u leguri Zrakoplovna idustrija i okviri za bicikle
		Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050	

Svojstva pojedinih legirnih elemenata kod legura aluminija [29]:

- Magnezij (Mg) povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom.
- Mangan (Mn) povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom.
- Bakar (Cu) značajno povećava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje, smanjuje otpornost na koroziju, duktilnost i zavarljivost.
- Silicij (Si) povećava čvrstoću i duktilnost, u kombinaciji s magnezijom omogućava precipitacijsko očvršćivanje.
- Cink (Zn) značajno povećava čvrstoću, dozvoljava precipitacijsko očvršćivanje, može izazvati napetosnu koroziju.
- Željezo (Fe) povećava čvrstoću čistog aluminija, uglavnom je zaostali element.
- Krom (Cr) povećava otpornost na napetosnu koroziju.
- Nikal (Ni) poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama.
- Titan (Ti) se koristi za smanjenje veličine zrna, naročito u dodatnom materijalu.
- Cirkonij (Zr) se koristi za smanjenje veličine zrna, naročito u dodatnom materijalu.
- Litij (Li) značajno povećava čvrstoću i Youngov modul, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje i smanjuje gustoću.
- Skandij (Sc) značajno povećava čvrstoću mehanizmom starenja materijala, koristi se za smanjenje veličine zrna osobito kod zavarivanja.
- Olovo (Pb) i bizmut (Bi) poboljšavaju svojstva kod obrade odvajanjem čestica.

Očvršćivanje nekaljivih (toplinski neobradivih) aluminijskih legura postiže se legiranjem sa Mn, Mg, Si, Fe, hladnom plastičnom deformacijom i žarenjem, pri čemu u krutoj otopini dolazi do disperzijskog otvrdnjavanja intermetalnim spojevima (čisti aluminij, Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mg legure) [16].

Osnovni legirajući elementi aluminijskih legura sa strukturnim očvršćivanjem (toplinski obradive) su: Cu, Si, Mg, Zn i Li. Ovi elementi imaju ograničenu topivost u aluminiju, a njihova maksimalna topivost je u području od 460 do 520 °C, te znatno opada sa smanjenjem temperature. Očvršćivanje ovih legura potiče se otapajućim žarenjem (450 – 550 °C), brzim

hlađenjem (najčešće u hladnoj vodi), te naknadnim prirodnim (kod sobne temperature) ili umjetnim starenjem (kod povišenih temperatura). Za neke aluminijske legure ovaj postupak očvršćivanja toplinskom obradom može se kombinirati deformacijskim starenjem. Ovu skupinu legura uglavnom čine: Al-Cu, Al-Si-Mg, te Al-Zn-Mg legure [16].

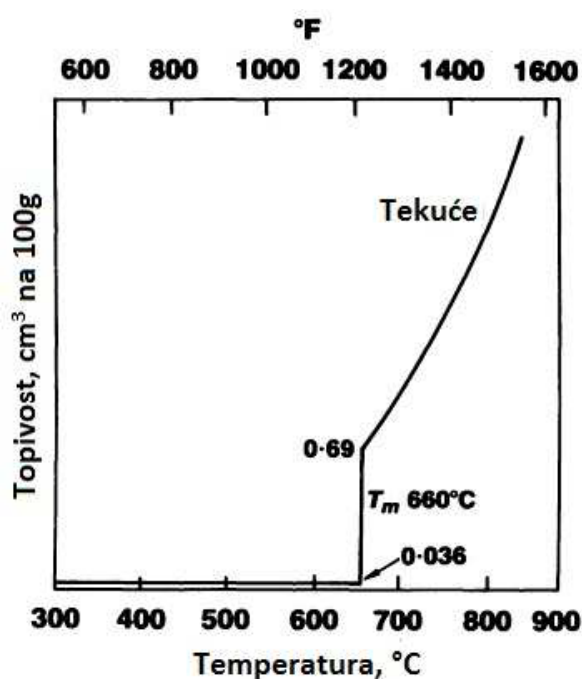
4.2.3 Zavarljivost aluminijskih legura

Na zavarljivost aluminijskih legura utječu [30]:

- Aluminijev oksid (Al_2O_3) je prirodni oksidni sloj koji je na hladnom materijalu debljine oko 0,01 mm. Daje dobru kemijsku otpornost. Aluminijski oksid Al_2O_3 ima visoku temperaturu taljenja ($2050\text{ }^\circ\text{C}$) i čini teškoće pri zavarivanju. Pri visokim temperaturama toplinske obrade ili zavarivanja krutog ili rastaljenog aluminijskog stvara se na površini deblji sloj oksida kao i na kapima metala, pa se ne može dobiti homogen zavareni ili lemljeni spoj zbog uključaka oksida. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za zavarivanja djelovanjem električnog luka u inertoj atmosferi (elektroda na "+" polu), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijskim nagrivanjem površine osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničkim odstranjivanjem.
- Dobra toplinska vodljivost.
- Visoka električna vodljivost.
- Veliki koeficijent toplinskog istezanja uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju, pa je moguća pojava pukotina zbog jakog stezanja.
- Rastvorljivost vodika u rastaljenom materijalu je velika. Pri kristalizaciji, zbog naglog pada rastvorljivosti, oslobađaju se mjehurići vodika, koji mogu uzrokovati poroznost.
- Pri zagrijavanju se ne mijenja boja kao kod čelika, pa se ne može procijeniti temperatura na temelju boje pri zagrijavanju do tališta, što uzrokuje poteškoće kod zavarivanja i lemljenja.
- Omekšanje na mjestu zavarenog spoja. Hladnom deformacijom Al – materijali postaju znatno čvršći. Na mjestu zavarenog spoja zbog ljevačke strukture čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju.

4.2.4 Najčešće nepravilnosti pri zavarivanju aluminijskih legura

Pore u zavarima kod aluminija najčešće dolaze kada plin vodik ostaje zarobljen za vrijeme skrućivanja taline. Vodik se zbog svoje visoke topivosti tijekom zavarivanja apsorbira u talinu zavora pri čemu se nakon skrućivanja taline stvaraju pore zbog smanjene topivosti (slika 19.). Nakon što se stvore mjehurići plina u zavaru, oni mogu isplivati na površinu zbog uzgona ili prisilnom konvekcijom unutar taline zavora. Preraspodjela vodika tijekom skrućivanja također može djelovati na potiskivanje pora iz taline. Položaj zavarivanja i parametri zavarivanja mogu značajno promijeniti količinu poroznosti u zavaru. Manjim brzinama zavarivanja dolazi do sporijeg skrućivanja što pogoduje izlasku plina iz zavora. Položaj zavarivanja vertikalno prema gore stvara najmanju poroznost zbog jednostavnog izlaska plina iz taline zavora. S druge strane, nadglavno zavarivanje stvara najveću količinu poroznosti i to u korijenu zavora. Količina vodika prisutna u zavarivanju ovisi o postupku kojim se zavaruje. Kod elektrolučnog zavarivanja izvori su: vodik iz osnovnog materijala, vodik iz dodatnog materijala i vodik u zaštitnom plinu [33].

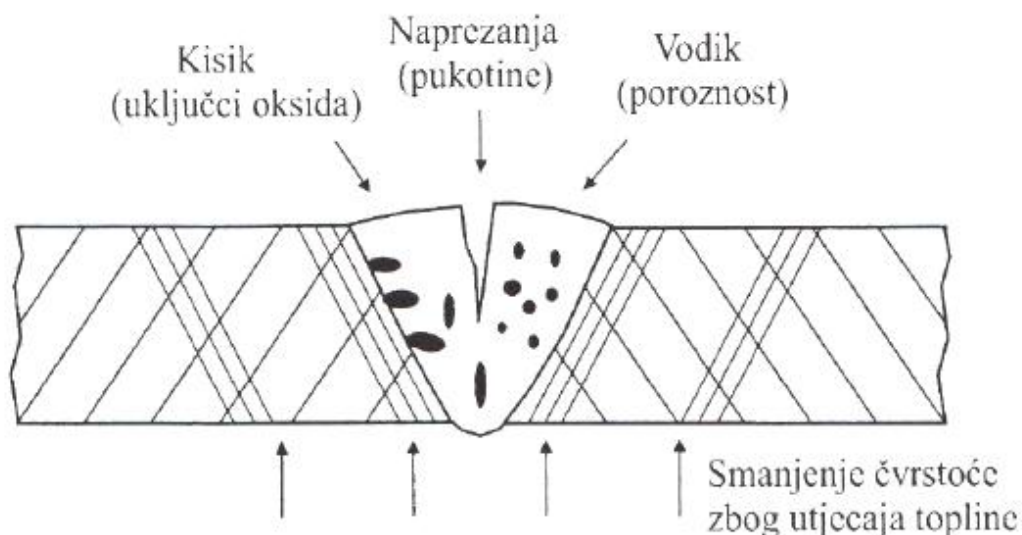


Slika 19. Topljivost vodika u aluminiju [31]

Solidifikacijske pukotine ili tople pukotine nastaju prilikom visokih toplinskih naprezanja i skupljanja tijekom skrućivanja taline zavara. Na osjetljivost aluminijskih legura prema pojavi solidifikacijskih pukotina utječe kombinacija mehaničkih, toplinskih i metalurških čimbenika. Solidifikacijske pukotine se stvaraju u metalu zavara i obično se pojavljuju duž sredine zavara ili na kraju zavara. Na njihovu pojavu utječe metal zavara i parametri zavarivanja. Visoki unosi topline dobiveni korištenjem visokih struja i malih brzina zavarivanja doprinose stvaranju pukotina. Iz toga se može zaključiti da postupci kod kojih je unos topline niži, smanjuju osjetljivost na pojavu stvaranja pukotina. Mogućnost pojave pukotina može se smanjiti odgovarajućim oblikovanjem zavarenog spoja i odgovarajućom tehnologijom. Međutim, potpuna eliminacija može se postići primjenom dodatnog materijala koji mora biti prilagođen određenom osnovnom materijalu.

Kako bi se smanjila osjetljivost na pojavu pukotina za odabir dodatnog materijala najčešće se koriste krivulje za binarni sustav materijala. Kod legura s više legiranih elemenata manji dodaci pojedinih elemenata mogu znatno utjecati na osjetljivost prema pukotinama time što šire raspon temperatura u kojima se formira koherentna struktura skrućivanja [31].

Na slici 20. prikazane su najčešće nepravilnosti pri zavarivanju aluminijskih legura, na sredini zavara najčešće dolazi do toplih pukotina, uključci kisika se najčešće pojavljuju uz stijenke zavara, dok se poroznost uzrokovane vodikom mogu pronaći kroz cijeli presjek.



Slika 20. Nepravilnosti pri zavarivanju Al i Al legura [30]

4.2.5 WAAM postupak aluminija

Da bi se aluminij mogao pravilno nanijeti WAAM postupkom potrebno je slijediti osnovne smjernice kao i kod zavarivanja aluminija:

- Odmastiti i očistiti površinu prije prvog prolaza,
- Koristiti odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje aluminija,
- Izabrati pravilne parametre zavarivanja,
- Ukoliko ima nečistoća i između prolaza očistiti zavar,
- Optimalna međuprolazna temperatura.

Parametri zavarivanja najviše utječu na izgled i svojstva nanesenih prolaza, ukoliko se koristi visoka struja dolazi do prevelikog unosa topline i talina se slijeva te dolazi do prevelikog širenja zida bez uzdizanja u visinu. Ako je struja za zavarivanje manja od potrebne dolazi do naljepljivanja sloja na sloj i dobivena struktura nije adekvatna. Isto tako brzina zavarivanja utječe na izgled kao i parametri: mala brzina povećava unos topline te dolazi kao i kod prevelike struje za zavarivanje širokog zavora, a kod prevelike brzine dolazi do naljepljivanja.

WAAM je postupak aditivne proizvodnje u kojem se dio dobiva nanošenjem sloja na sloj pomoću žice i električnog luka. Električni luk tali žicu po sredini uzorka gdje dolazi do potpunog miješanja sa prethodnim slojem, talina se tijekom zavarivanja razlijeva i na rubovima slojeva ne dolazi do protaljivanja. Taj fenomen je posebno izražen kod zavarivanja aluminija i njegovih legura zato što aluminij odlično provodi toplinu i talina nema dovoljno vremena da na rubovima rastali prethodni sloj, nego na tim mjestima dolazi do naljepljivanja.

Isto tako kod WAAM postupka za aluminij treba obratiti pozornost na stvaranje pora i moguće pukotine u materijalu. Da bi se izbjegli mogući problemi koristi se kontrola mikrostrukture, žica mora biti kvalitetna i dobro skladištena, naknadna toplinska obrada, te se koristi kao i kod titanovih legura valjanje između slojeva da bi se dobila bolja mehanička svojstva, stoga i mikrostruktura.

5. WAAM TITANOVIIH LEGURA

Najčešće korištena titanova legura u industriji je Ti-6Al-4V, odlikuju je dobra svojstva za zavarivanje, odlična mehanička svojstva, dobra korozijska postojanost, moguće ga je oblikovati odvajanjem čestica i obradom deformiranjem. Spada u grupu $\alpha + \beta$ legura, te zastupa čak 50% ukupne potrošnje titana i njegovih legura u industriji [32].

U tablici 3. prikazan je kemijski sastav titanove legure Ti-6Al-4V, a u tablici 4. mehanička svojstva.

Tablica 3. Udio materijala u leguri titana [33]

Element	Al	V	Ti	O	Fe
Max. udio elementa, %	6	4	90	0,2	0,25

Tablica 4. Mehanička svojstva Ti-6Al-4V [34]

Vlačna čvrstoća R_m	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$	Istezljivost A_5	Tvrdoća po Brinellu HB
275-350 N/mm ²	125 N/mm ²	15%	75

Legura Ti-6Al-4V se koristi za [33]:

- Prototipe za avioindustriju i automobilsku industriju,
- Implants i proteze za medicinsku industriju,
- Turbine,
- Kemijsku industriju.

Razlog zašto je WAAM u zadnje vrijeme poprima sve veću pažnju i popularnost za izradu dijelova je sigurno cijena titana. Cijena žice od titana se kreće od oko 100 £/kg pa sve do 250 £/kg, ovisno o debljini žice. Ovisno o tehnologiji izrade dijela od titana Buy To Fly omjer može biti i oko 20, u usporedbi s WAAM gdje bi uvijek trebao biti ispod 2, ako su parametri dobro podešeni. Ako to uzmemo u obzir, kao i relativno nisku početnu investiciju, vidi se ogromna ušteda u sveukupnoj cijeni čak do 69% [35].

Faktori koji utječu na cijenu titanovih legura [23]:

1. Da bi se izradilo titan, potrebno je iskoristiti velike količine energije. Za izradu tone titana potrebno je čak 16 puta više energije nego za proizvodnju tone čelika i 1,7 puta više energije je potrebno za proizvodnju tone aluminija.
2. Titan je skup materijal za daljnju obradu, obrada odvajanjem čestica titana je čak 10 puta skuplja od obrade odvajanjem čestica aluminija.
3. Nije kompatibilan s visoko produktivnim postupcima zavarivanja kao što su zavarivanje pod troskom i zavarivanje praškom punjenom žicom.
4. Visok Buy To Fly (BTF) omjer kod većine proizvoda.

Kod zavarivanja titanovih legura WAAM tehnologijom potrebno je poduzeti mjere zaštite i uvesti modifikacije da bi se mogao izvesti postupak bez pogrešaka i sa zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima. Za zavarivanje se ne koristi CMT proces zbog lutanja luka, nego se koriste plazma ili TIG izvori. Uočeno je da kod zavarivanja dolazi do anizotropije β faze, što može dovesti do smanjenja vijeka trajanja i lošijih mehaničkih svojstva, da bi se takva raspodjela faza izbjegla moguće je promijeniti skrućivanje taljevine preko promjene parametara zavarivanja ili promjenom legure. Ni jedan od ta dva slučaja u WAAM postupku nije primjenjiv zato što je potrebno dobiti dio sa zadanim tolerancijama i nije dopušteno stvaranje krhke faze TiB.

Da bi se dobila potrebna svojstva i smanjila zaostala naprezanja u materijalu, uvodi se dodatna deformacija u tijeku izrade odmah nakon svakog prolaska pištolja za zavarivanje. Deformacija se izvodi s valjkom koji je integriran u sistem da bi se svaki novi sloj mogao deformirati, ovakav pristup limitira izradu na relativno jednostavne konstrukcije, ali rješava problem β faze [24].

Prva posebnost zavarivanja titana je nužnost korištenja komore za zavarivanje za temperature iznad 427 °C da bi se izbjegla oksidacija, zato titan nije moguće navarivati u normalnoj atmosferi nego je potrebna inertna atmosfera od 100% argona. Za tu svrhu moguće je koristiti standardnu komoru ili šator za postizanje inertne atmosfere. Druga je posebnost u vidu valjka za mehaničko deformiranje svakog prolaza s kojim se poslije svakog prolaza deformira dobiveni prolaz i smanjuje veličina zrna, a time i poboljšavaju mehanička svojstva [24].

6. USPOREDBA CIJENA TRADICIONALNIH POSTUPAKA SA WAAM-OM

U tradicionalnoj proizvodnji potrebna je obrada odvajanjem čestica ili nekom drugom tehnologijom da bi se došlo do gotovog proizvoda. WAAM postupak olakšava izradu pojedinačnih dijelova od skupih materijala koje nije isplativo držati na skladištu i snižava ukupnu cijenu proizvodnje takvih dijelova zahvaljujući nižem BTF omjeru.

$$BTF = \frac{V_u}{V_i} \quad (2)$$

V_u – Masa dijela prije obrade

V_i – Masa dijela nakon obrade

Najzanimljiviji materijal za WAAM postupak je titan koji se sve više koristi u zrakoplovnoj industriji zato što proizvođači koriste sve više ugljičnih vlakana koja nisu kompatibilna s aluminijem. Titan je kompatibilan s ugljičnim vlaknima te zamjenjuje aluminij u mnogim primjenama i predviđa se da će se u budućnosti koristiti sve više. Ekološki gledano, za proizvodnju 1 kg titana potrebno je 361 MJ do 745 MJ energije te ima visoku emisiju ugljičnog dioksida (19 kg kg^{-1} do 39 kg kg^{-1}).

U zrakoplovnoj industriji većina dijelova se radi od standardnih kvadratnih profila koji se režu od dužih profila te se onda obrađuju odvajanjem čestica.

U tablici 5. prikazane su neke standardne komponente te njihove mase prije i poslije obrade. Izračunat je njihov BTF omjer, tablica daje zoran prikaz koliko se materijala mora odbaciti da bi se napravio neki dio. Razlika se još više vidi kada se pogleda BTF omjer za kompleksnije komponente u tablici kao što je krilo aviona. BTF omjer za krilo aviona je 37 što predstavlja ogroman gubitak u materijalu.

Tablica 5. BTF omjeri za neke zrakoplovne komponente [35]

Komponenta	Masa prije obrade (kg)	Gotova komponenta (kg)	BTF omjer
Jednostavna prirubnica	67	11,1	6
Kompleksna prirubnica	149	7,7	19,4
Krilo aviona	657	18	37
Veliki rotor	810	97	8,4

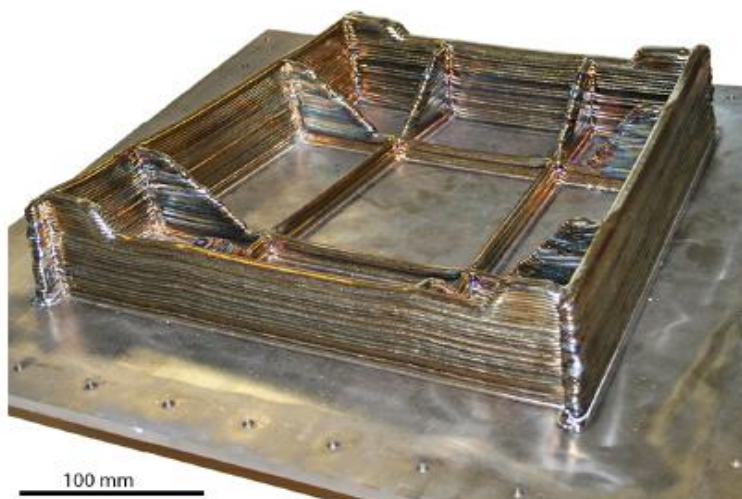
Cijena dijela napravljenog s WAAM postupkom u većini slučajeva ima manju cijenu od obrade dijela odvajanjem čestica, ova razlika pogotovo postaje vidljiva kada usporedimo dijelove od skupih materijala. U tradicionalnoj proizvodnji očekivani BTF omjer za izradu nekoga dijela je obično oko 10, ali može biti i puno viši ovisno kakvog je tipa konstrukcija. U tablici 6. dani su BTF omjeri za izradu aluminijskog krila aviona odvajanjem čestica i WAAM postupkom.

Tablica 6. Usporedba WAAM procesa sa tradicionalnim procesom [35]

Tip izrade	BTF	Cijena, £	Ušteda, %
Obrada odvajanjem čestica	6,5	7,2	/
WAAM	2,15	5,1	29%

Istraživanje je pokazalo da povećanje mase depozita po satu (kg/h) iznad 1 kg/h ne predstavlja uštedu ukoliko se radi o robotskoj sustavu. Do toga dolazi zato što se na masama iznad 1 kg/h povećava BTF omjer te se stoga povećava vrijeme naknadne opreme i masa iskorištenog materijala [35].

Na slici 21. prikazano je postolje za slijetanje zrakoplova napravljeno od titana. Dimenzije postolja su 800mm x 700mm x 14mm. Identično postolje je napravljeno od titana i čelika. Masa postolja od titana je 20 kg, a masa postolja od čelika je 36 kg.



Slika 21. Postolje za slijetanje zrakoplova [35]

U tablici 7. dan je prikaz cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljenog od titana. U tablici se vidi da je BTF omjer za WAAM 2.3, dok je za obradu odvajanjem čestica 12. Prikazana je i cijena u tisućama £. Sniženje ukupne cijene za dio od titana je 69%. U tablici 8. dan je prikaz cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljenog od čelika. Tablica prikazuje BTF omjer i cijenu tipa obrade. Ukupno sniženje cijene je 55%.

Tablica 7. Cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljena od titana [35]

Tip obrade	BTF	Cijena(£k)	Sniženje ukupne cijene
Obrada odvajanjem čestica	12	16.2	/
WAAM	2.3	0.7	69%

Tablica 8. Cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljena od čelika [35]

Tip obrade	BTF	Cijena(£k)	Sniženje ukupne cijene
Obrada odvajanjem čestica	12	1.6	/
WAAM	2.3	0.7	55%

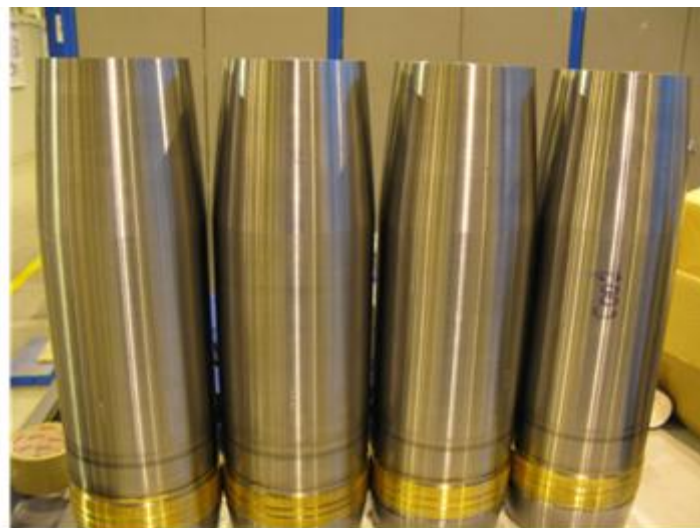
7. UPOTREBA WAAM POSTUPKA

WAAM postupak omogućuje decentraliziranu proizvodnju dijelova od raznih vrsta materijala kao što su čelici, aluminij i legure, titan i legure, bakar i drugi. Danas kada je cilj smanjiti vrijeme proizvodnje, a kod skupljih materijala i njihovu cijenu ovakva tehnologija daje optimalna svojstva. Koristi se i za izradu prototipa za automobilsku i avioindustriju.

Na slici 22. prikazana je proizvodnja kućišta za rakete od čelika mase 32 kg. Brzina nanošenja depozita je 4 kg/h. Na slici 23. prikazana su kućišta nakon završne obrade odvajanjem čestica.



Slika 22. Proces izrade kućišta za rakete [35]



Slika 23. Kućište za rakete nakon završne obrade [35]

Na slici 24. prikazan je model krila za korištenje u aerotunelu napravljen od čelika pomoću Froniusovog CMT procesa.



Slika 24. Model krila napravljen WAAM procesom [22]

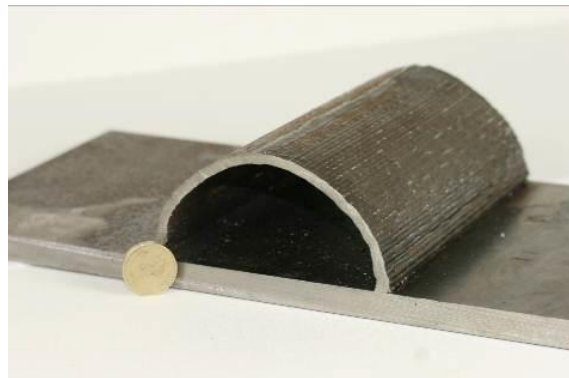
Na slici 25. prikazan je propeler napravljen u 40 prolaza na fakultetu u Wollongongu. Kao što je vidljivo sa slike, polovica propelera je obrađena naknadnom obradom odvajanjem čestica.



Slika 25. Propeler izrađen WAAM procesom [36]



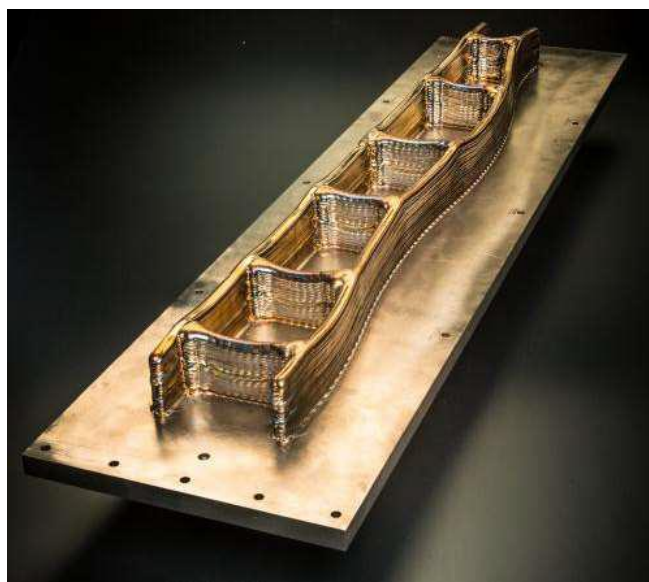
Slika 26. Kvadratna zatvorena konstrukcija izrađena WAAM postupkom [36]



Slika 27. Polukružna konstrukcija izrađena WAAM postupkom [36]

Na slikama 26. i 27. prikazano je kako je moguće pomoću WAAM postupka napraviti zatvorene konstrukcije bez potpornjeva. Na slici 26. je kvadratna struktura 50 mm širine, a na slici 27. je polukrug radiusa 50 mm.

Na slici 28. prikazano je krilo aviona dužine 1,2 m, napravljeno za tvrtku BAE Systems od titanove legure Ti-6Al-4V. Ovo krilo aviona predstavlja model krila kakvo se koristi za vojni avion F35. Da bi se izbjeglo deformiranje radnog komada, krilo je izrađeno na obje strane, nakon izrade dio je podvrgnut toplinskoj obradi prije odvajanja od ploče. BTF omjer je 2,2 što predstavlja uštedu od 29%.



Slika 28. Krilo aviona napravljeno od titanove legure Ti-6Al-4V [36]

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1 Oprema za WAAM postupak

Oprema za WAAM postupak sastoji se od izvora struje za zavarivanje i robota ili nekog drugog uređaja za manipulaciju s pištoljem. U ovom eksperimentu korišten je modularni automatski stroj koji osigurava konstantnu brzinu i linijsko vođenje.

Na slici 29. prikazan je OTC Welbee P400 izvor struje za zavarivanje, boce sa zaštitnim plinom, Bug-O Systems MDS – 1002 uređaj, pištolj za zavarivanje i WAAM uzorci na osnovnom “žrtvenom” materijalu. Za osnovni materijal se kaže da je žrtveni zato što se s njega izrezuju uzorci i on nema funkciju u gotovom proizvodu.



Slika 29. Postav eksperimenta i opreme za WAAM postupak

8.1.1 Izvor struje za zavarivanje OTC Welbee P400

Kao izvor struje u eksperimentu korišten je OTC Welbee Inverter P400. Welbee P400 je pulsni MIG/MAG aparat za zavarivanje sa sinergijskim funkcijama. Izvor za zavarivanje može isporučiti istosmjernu (DC) struju, impulsnu istosmjernu struju (DC PULSE) i istosmjernu valnu impulsnu struju (DC WAVE PULSE). Welbee P400 je pogodan za zavarivanje raznih vrsta materijala i ima sinergijske funkcije za nehrđajući čelik, aluminij, aluminijeve legure, titan, meke čelike, Inconel i za lemljenje bakrenih legura. Kod uređaja sa sinergijskim funkcijama potrebno je izabrati samo 2 parametra dok uređaj sam određuje ostale parametre. S ovim izvorom je moguće i TIG zavarivati kao i ručno elektrolučno, te je pogodan za robotsku i ručnu upotrebu. Na slici 30. prikazan je uređaj OTC Welbee P400 koji je korišten u eksperimentu.



Slika 30. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400

U tablici 9. prikazane su osnovne karakteristike OTC Welbee P400 izvora za zavarivanje. Intermitencija (eng. Duty cycle) je omjer vremenskog intervala unutar kojega je izvor struje za zavarivanje opterećen s obzirom na propisani maksimalni radni interval. Intermitencija je drugim riječima radni ciklus, prikazuje maksimalno vrijeme tijekom kojega je izvor struje sposoban isporučiti tražene izlazne parametre. Uređaj P400 može zavarivati pri maksimalnoj struji od 400 A 5 minuta, a pri struji od 283 A se ne zagrijava tako jako pa ga je moguće koristiti i više od 10 minuta. Statička karakteristika uređaja je konstantan napon struje (engl. Constant Voltage) što znači da izvor održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja s visinom električnog luka.

Tablica 9. Karakteristike OTC Welbee P400 izvora struje [37]

Napon napajanja ($\pm 15\%$)	3x400 V
Frekvencija mreže	50/60 Hz
Radni napon	12 V - 34 V
Raspon struje	30 A - 400 A
Radni ciklus 10 min/40° C	50% na 400 A
Radni ciklus 10 min/40° C	100% na 283 A
Broj funkcija za zavarivanje	100
Okolišna temperatura	-10 °C - 40 °C
Dimenzije d/š/v [mm]	710/395/592
Masa	62 kg
Statička karakteristika	Konstantan napon struje (engl. CV)

8.1.2 Bug-O Systems MDS - 1002

Uređaj MDS - 1002 je modul za precizno linijsko vođenje raznih postupaka zavarivanja ili rezanja. MDS – 1002 je postavljen na vodilicu koja osigurava pravocrtno kretanje, na uređaj je montiran pištolj za zavarivanje. Uređaj ima kontrolu brzine od 5,1 cm/min do 304,8 cm/min. Na slici 31. prikazan je uređaj korišten u eksperimentu.



Slika 31. Bug-O Systems MDS - 1002 uređaj

8.1.3 Žica za zavarivanje

U eksperimentu je korištena aluminijska žica za zavarivanje OK Autrod 18.16/5183 od proizvođača ESAB. Žica je razvijena da bi se postigla maksimalna moguća čvrstoća za zavarivanje EN AW 5183 i ostalih aluminijevih legura s magnezijem. Legura nije pogodna za uporabu na visokim temperaturama zato što je podložna napetosnoj koroziji. Debljina žice korištene u eksperimentu je 1,2 mm. U tablici 10. prikazan je kemijski sastav žice za zavarivanje OK Autorod 18.16/5183.

Tablica 10. Kemijski sastav žice za zavarivanje [38]

Kemijski element	Mg	Zn	Fe	Cu	Ti	Si	Mn	Al	Cr
Maseni udio, %	4,90	0,01	0,13	0,01	0,10	0,04	0,65	94,20	0,08

8.1.4 Osnovni materijal EN AW 5083 (AlMg4,5Mn)

Kao osnovni materijal korišten je EN 5083 H 111 debljine 10 mm. Ovaj materijal spada u skupinu Al-legura koje ne očvršćuju toplinskom obradom, već hladnom deformacijom. Ove legure se dobro zavaruju, imaju visoka mehanička svojstva pri niskim temperaturama, visoku otpornost na morsku koroziju (posebice s višim sadržajem magnezija). Oblikovljivost je dobra, ali opada s porastom sadržaja magnezija. Pri zavarivanju u području zavarenog spoja (grubozrnata ljevačka struktura) može doći do omekšanja i smanjenja čvrstoće jer se ponište učinci hladne obrade [17].

Dodatak H iza oznake za skupinu legure predstavlja hladno deformirano stanje. Iza oznake H uvijek slijede dva ili više brojeva koji označavaju kombinaciju postupaka hladnog deformiranja i provedene toplinske obrade.

EN AW 5083 se koristi u graditeljstvu, automobilskoj industriji, brodogradnji, za tlačne posude i cjevovode, u strojogradnji, prehrambenoj industriji.

U tablici 11. prikazan je kemijski sastav legure EN AW 5083, a u tablici 12. prikazana su mehanička svojstva EN AW 5083.

Tablica 11. Kemijski sastav legure EN AW 5083 [39]

Kemijski element	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Ostali elementi
Maseni udio, %	4,0 - 4,9	0,40	0,40	0,10	0,40 - 1,0	0,05 - 0,25	0,15	0,25	0,15

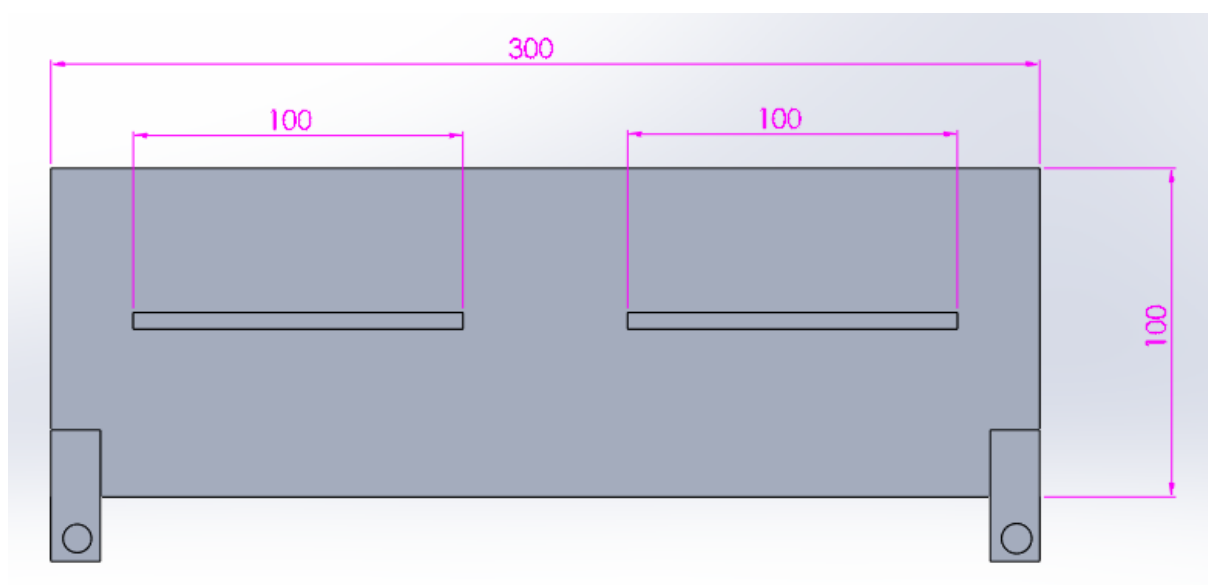
Tablica 12. Mehanička svojstva legure EN AW 5083 [39]

Vlačna čvrstoća R_m	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$	Istezljivost A_5	Tvrdoća po Brinellu HB
275-350 N/mm ²	125 N/mm ²	15%	75

8.2 Tijek eksperimenta

Zadatak eksperimenta je definirati primjenjive parametre MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. U eksperimentu je prikazan utjecaj promjene frekvencije impulsne struje sa stanovišta pojave pora i drugih nepravilnosti.

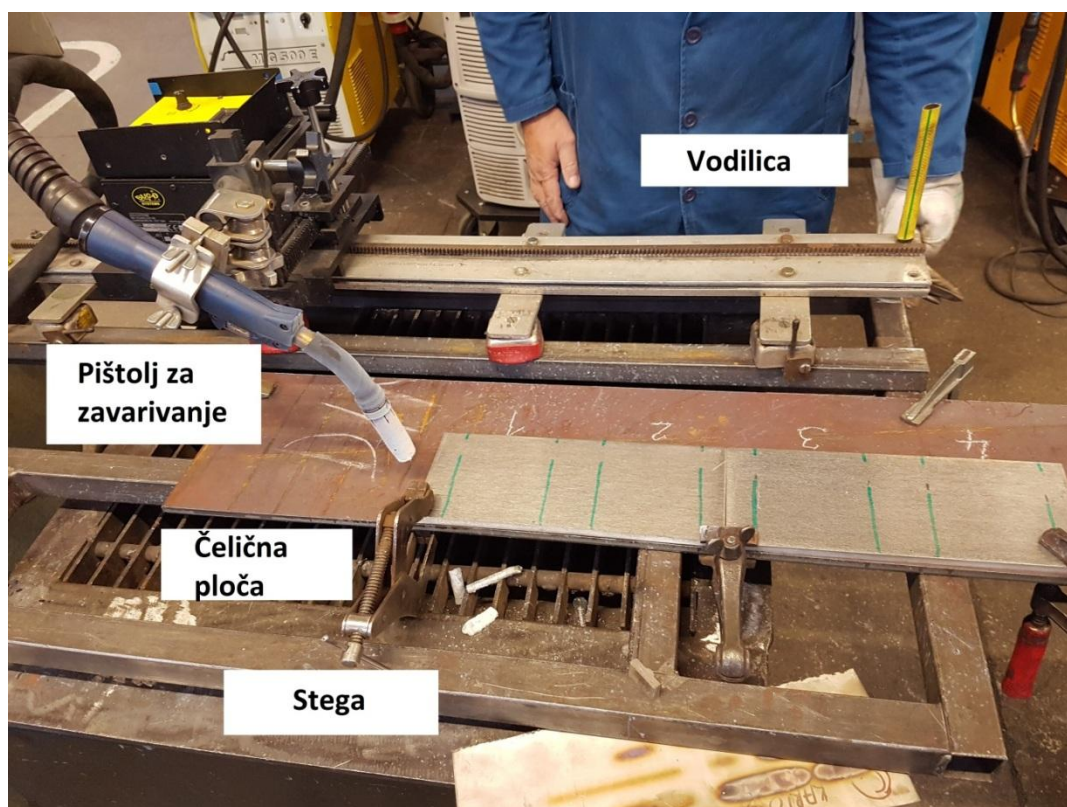
Na slici 32. prikazan je plan eksperimenta, na osnovni materijal se navaruju uzorci dužine 100 mm, dopuštena međuprolazna temperatura je 50 °C, ispod osnovnog materijala postavljena je čelična ploča koja poboljšava odvođenje topline i smanjuje vrijeme čekanja između prolaza.



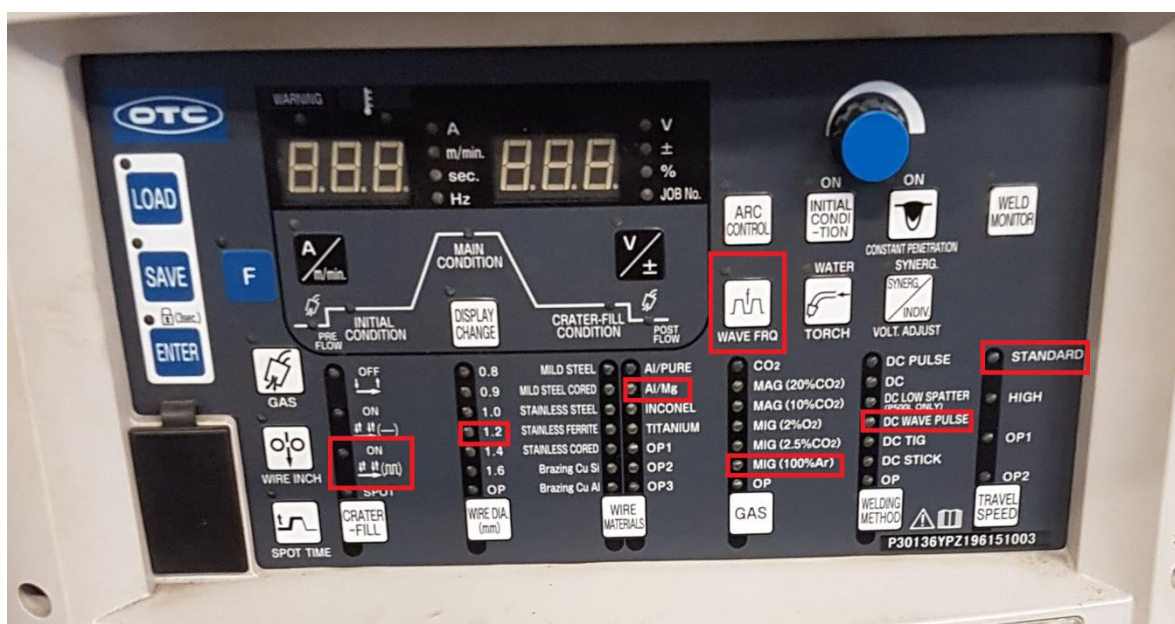
Slika 32. Plan eksperimenta

U eksperimentu je korištena lijeva tehnika rada da bi se smanjio unos topline u zavareni spoj, kod aluminija je potrebno koristiti minimalni unos topline zbog pogrubljenja zrna i da ne dođe do razlijevanja tijekom depozita viših slojeva. Razlijevanje taline kod WAAM postupka nije poželjno zato što je potrebno dobiti nanos u visinu, a ne u širinu koja se uklanja naknadnom obradom.

Na slici 33. prikazan je osnovni materijal koji je pričvršćen sa stegama na čeličnu ploču, pištolj za zavarivanje koji je montiran na Bug-O Systems automat i njegovu vodilicu koja osigurava linijsko pomicanje.



Slika 33. Priprema za eksperiment



Slika 34. Upravljačka ploča izvora za zavarivanje i izabrani parametri

Na slici 34. prikazana je upravljačka ploča izvora za zavarivanje OTC Daihen Welbee P400 s označenim funkcijama koje su korištene. Montirana je žica za zavarivanje debljine 1,2 mm pa je odabrana debljina žice od 1,2 mm. Materijal žice za zavarivanje je legura aluminija i magnezija EN AW 5183 te je izabrana funkcija za zavarivanje Al/Mg materijala. Za zavarivanje aluminija se koristi zavarivanje u atmosferi inertnog plina – MIG zavarivanje u atmosferi čistog argona. Izabrana funkcija je MIG (100% Ar). Za metodu zavarivanja izabrana je funkcija DC WAVE PULSE koja omogućava mijenjanje razine impulsnih struja. S odabirom DC WAVE PULSE metode zavarivanja, omogućava se korištenje WAVE FRQ funkcije u kojoj se podešava frekvencija više i niže razine struja. Brzina zavarivanja je postavljena na STANDARD ili na normalnu brzinu zavarivanja.

Od dodatne opreme korištena je još aluminijska četka s kojom se poslije svakog prolaza čistio uzorak od troske i oksida, te visinomjer pomoću kojeg je praćena visina uzorka poslije svakog sloja. Na slici 35. prikazano je mjerenje visine uzorka pomoću visinomjera.



Slika 35. Mjerenje visine uzorka pomoću visinomjera

U tablici 13. prikazani su osnovni parametri korišteni u eksperimentu. Korišteni postupak je DC WAVE PULSE, dužina uzorka predviđena eksperimentom iznosi 100 mm, dok predviđena visina uzorka iznosi 40 mm, brzina zavarivanja podešena na Bugo Systems automatu je 34 cm/min, protok argona iznosi 15 l/min, međuprolazna temperatura je postavljena na 50 °C i mjerena je pomoću uređaja za infracrveno mjerenje temperature - 568 IR Termometer proizvođača FLUKE, udaljenost sapnice od radnog komada postavljena je na 15 mm i prije svakog prolaza je ponovno podešena, tehnika rada u eksperimentu je lijeva da bi se smanjio unos topline i nagib pištolja za zavarivanje u odnosu na radni komad postavljen je na 15 °.

Tablica 13. Parametri zavarivanja

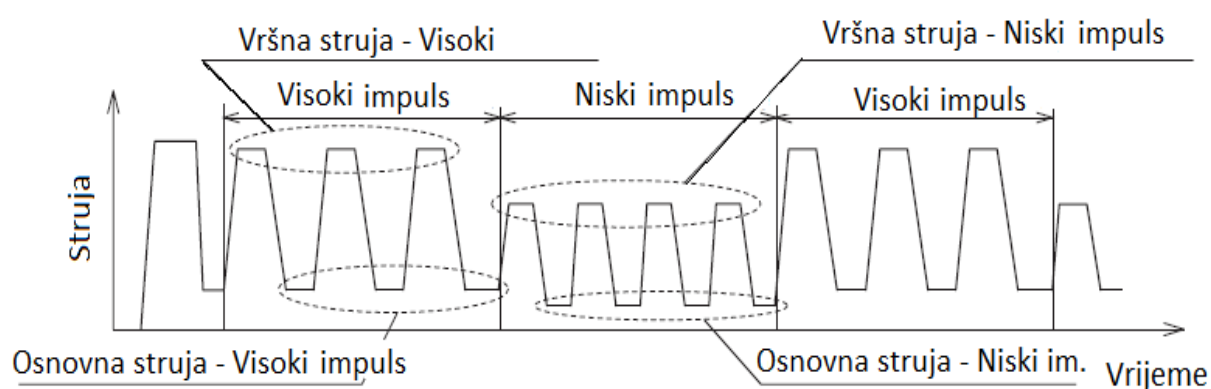
Postupak zavarivanja	DC WAVE PULSE
Dužina uzorka	100 mm
Brzina zavarivanja	34 cm/min
Protok plina	15 l/min
Međuprolazna temperatura	50 °C
Udaljenost kontaktne cjevčice	15 mm
Tehnika rada	Lijeva
Nagib pištolja za zavarivanje	15 °

Odabirom DC WAVE PULSE funkcije na izvoru struje za zavarivanje otvara se mogućnost promjene frekvencije impulsa. U tablici 14. prikazana je odabrana frekvencija impulsa za uzorke.

Tablica 14. Promjenjivi paramteri korišteni u eksperimentu

Broj uzorka	Frekvencija impulsa
1	6 Hz
2	12 Hz
3	9 Hz

Funkcija zavarivanja DC WAVE PULSE ciklički izmjenjuju dvije razine impulsne struje da bi dobio zavar sličan ribljoj ljuski. Na slici 36. prikazana je funkcija za zavarivanje DC Wave Pulse. Na slici se vidi cikličko izmjenjivanje niskog i visokog impulsa koji se koristi za smanjenje unosa topline.



Slika 36. Funkcija zavarivanja DC Wave Pulse [37]

U tablici 15. prikazani su iznosi struje korišteni u svakom prolazu, iznos struje se direktno unosi na izvoru za zavarivanje dok sinergijska funkcija uređaja određuje sve ostale parametre. Dubina prolaza je mjerena pomoću visinomjera na sredini uzorka. Uzorak nije ravnomjerne visine po cijeloj dužini nego je na početku viši, a pred kraj niži zbog zagrijavanja uslijed unosa topline. Na uzorku 1 postignuta je visina od 39,2 mm, na uzorku 2 visina od 40,8 mm, a na uzorku 3 visina od 39,5 mm.

Tablica 15. Parametri zavarivanja i dubina uzorka svakog prolaza

Prolaz broj	Struja	Visina uzorka [mm]			Unos topline [kJ/cm]
		1. uzorak	2. uzorak	3. uzorak	
1	240 A	/	/	/	8,81
2	210 A	7,7	7,8	8,0	7,26
3	150 A	11,0	11,2	11,5	4,55
4	150 A	13,5	14,8	15,0	4,55
5	135 A	15,8	16,9	16,3	3,96
6	120 A	17,9	19,0	18,2	3,39
7	120 A	19,5	21,1	20,7	3,39
8	112 A	21,1	23,6	22,2	3,10
9	112 A	23,6	25,0	24,7	3,10
10	112 A	25,9	27,9	26,8	3,10
11	112 A	27,2	29,7	28,6	3,10
12	112 A	29,8	31,1	30,2	3,10
13	112 A	32,0	32,8	31,5	3,10
14	112 A	34,6	34,1	33,0	3,10
15	112 A	36,2	36,2	35,9	3,10
16	112 A	38,1	38,5	38,1	3,10
17	112 A	39,2	40,8	39,5	3,10



Slika 37. Uzorak broj 1 nakon prvog prolaza

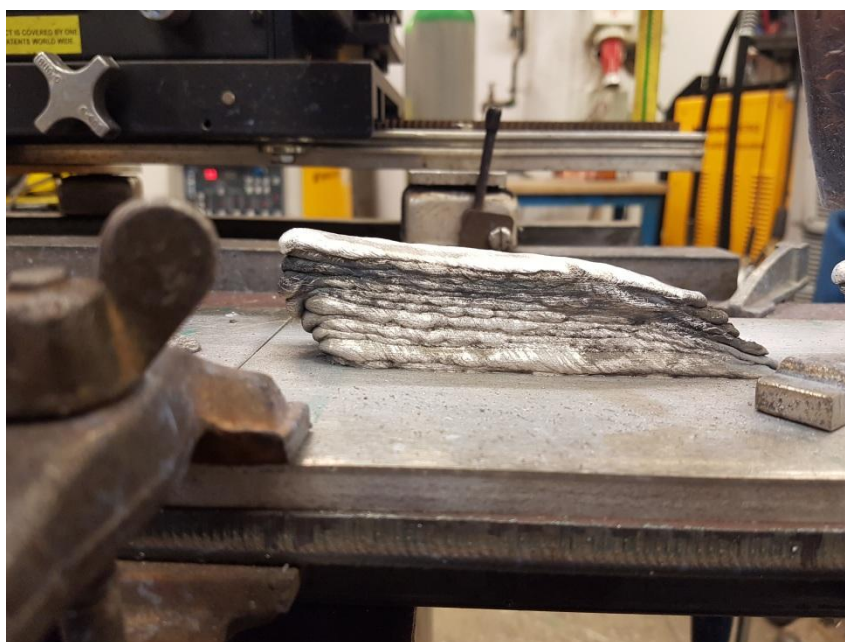
Na slici 37. prikazan je uzorak 1 nakon prvog prolaza, korištena struja iznosi 240 A, a drugi parametri su podešeni od strane izvora za zavarivanje. Na slici je prikazan uzorak prije čišćenja aluminijskom četkom. Na slici 38. prikazan je očišćeni uzorak nakon 6 prolaza.



Slika 38. Uzorak broj 1 nakon šest prolaza



Slika 39. Uzorak broj 2 nakon šest prolaza i četkanja



Slika 40. Uzorak broj 2 nakon 12 prolaza

Na slikama 39. i 40. prikazan je uzorak 2 nakon 6 i 12 prolaza. Na slikama se vidi valovitost aditivne proizvodnje pomoću žice i električnog luka i postupno povećanje visine uzorka.



Slika 41. Uzorak 1 nakon 17 prolaza



Slika 42. Uzorci 2 i 3 nakon 17 prolaza

Na slikama 41. i 42. prikazani su uzorci nakon posljednjeg 17. prolaza. Na slikama se vidi kako je visina uzorka na početku viša, a pred kraj uzorka niža. Ta pojava se pripisuje unosu topline tijekom zavarivanja i temperaturi uzorka koja je na početku uzorka niska i povećava se tijekom zavarivanja, što dovodi do veće pokretljivosti taline i njezinom slijevanju pred kraj.

8.3 Ispitivanja uzoraka

8.3.1 Priprema uzoraka za ispitivanje

Uzorci su nakon nanošenja podvrgnuti obradi odvajanjem čestica. Iz svakog uzorka izrezan je po jedan uzorak iz sredine za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture.

Da bi se ispravno snimila mikrostruktura i makrostruktura, potrebno je kvalitetno obraditi uzorke. Nakon izrezivanja uzoraka podvrgnuti su brušenju na stupnoj brusilici. Da bi se postigla potrebna kvaliteta, nakon brušenja na stupnoj brusilici uzorci su ispolirani na uređaju za poliranje, brzinom od 300 okr/min. Poliranje je provedeno na brusnim papirima granulacije do P4000. Nakon poliranja uzorci su u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, nagrizani u Kellerovom reagentu u trajanju 60 sekundi. Kellerov reagent se koristi za nagrizanje aluminijske i aluminijevih legura da bi se vidjele granice i orijentacija zrna.

8.3.2 Metalografska ispitivanja

U praksi se sva metalografska ispitivanja obavljaju pomoću dvije metode [40]:

- Makroskopska, koja obuhvaća vizualnu kontrolu i uvećanja do 50 puta,
- Mikroskopska ispitivanja, s povećanjem od 20-2000 puta pomoću optičkih ili elektronskih mikroskopa.

Pogreške u zavarenom spoju metala izvedenog taljenjem sistematizirane su i opisane u međunarodno prihvaćenoj normi HRN EN ISO 6520 - 1. Prema toj normi pogreške u zavarenom spoju svrstane su u šest osnovnih skupina:

- Skupina 100 – Pukotine,
- Skupina 200 – Šupljine (poroznosti),
- Skupina 300 – Uključci čvrstih tijela,
- Skupina 400 – Nedovoljno vezivanje i penetracija,
- Skupina 500 – Pogreške oblika,
- Skupina 600 – Ostale pogreške.

Makroanaliza uzoraka

Makroanalizom uzoraka vidljive su karakteristike zavora, dubina penetracije, linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala, veličina zone utjecaja topline, broj prolaza, veličina i raspodjela uključaka, te poroznost u zavarima.

Obradeni uzorci fotografirani su digitalnim fotoaparatom Olympus C-5050 i prikazani su na slikama.

Na fotografijama makroanalize uzoraka 1, 2 i 3 nisu zamijećene pogreške iz skupina 100; 200; 300; 600 (slike 43., 44. i 45.). Zamijećene su pogreške iz skupine 400 – nedovoljno vezivanje i penetracija. Pogreške iz skupine 400 primjećuju se na valovitostima između slojeva gdje nije došlo do protaljivanja nego do naljepljivanja. Kao što se vidi sa slike teško je postići savršenu centriranost procesa, potrebna je kruta oprema da ne bi došlo do nepravilnog slaganja slojeva kao na uzorku 1 u gornjem dijelu. Isto tako na uzorku broj 3 vidi se kada se jednom pogrešno postavi prolaz, svaki drugi se veže na njega i povećava nepravilnost oblika.



Slika 43. Makroanaliza uzorka 1



Slika 44. Makroanaliza uzorka 2

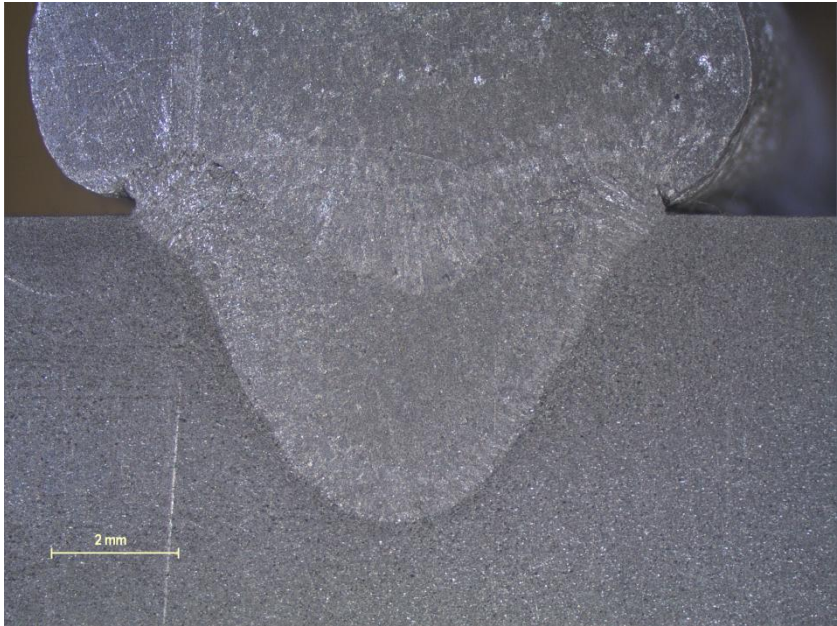
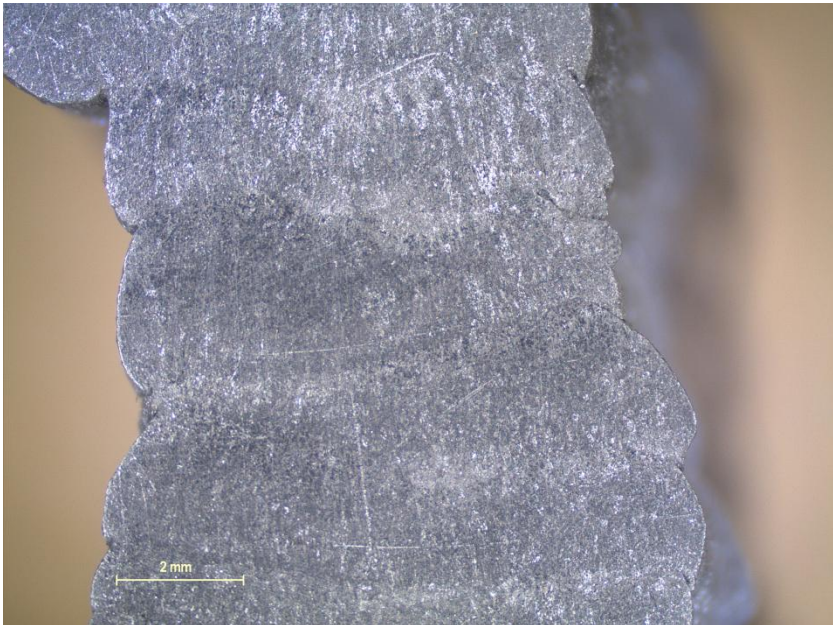


Slika 45. Makroanaliza uzorka 3

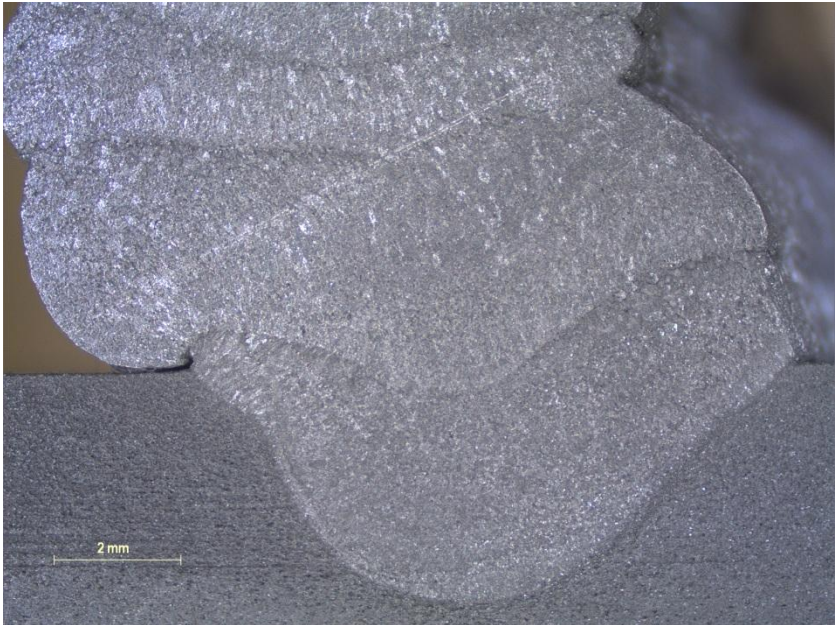

Iskoristiva širina zida za uzorak 1 iznosi 8 mm, za uzorak 2 iznosi 9 mm te za uzorak 3 iznosi 9,6 mm.

U tablicama 16.-18. prikazane su makroanalize uzoraka 1, 2, 3 snimljene na mikroskopu Leica MZ6. Povećanje mikroskopa korišteno za prikaz u tablicama je 10 puta. Na prvoj slici u tablici prikazana je zona utjecaja topline i penetracija u osnovni materijal. Na drugoj slici je prikazana sredina uzorka.

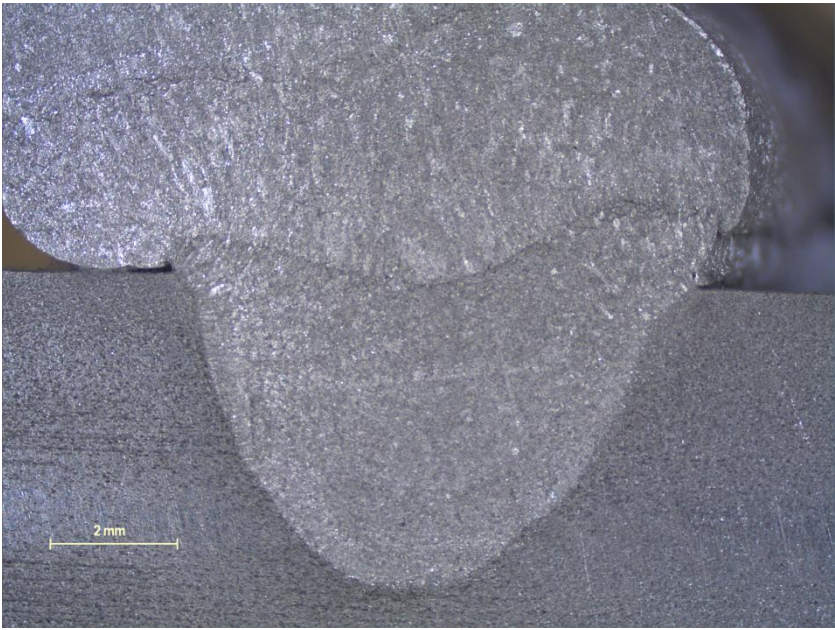
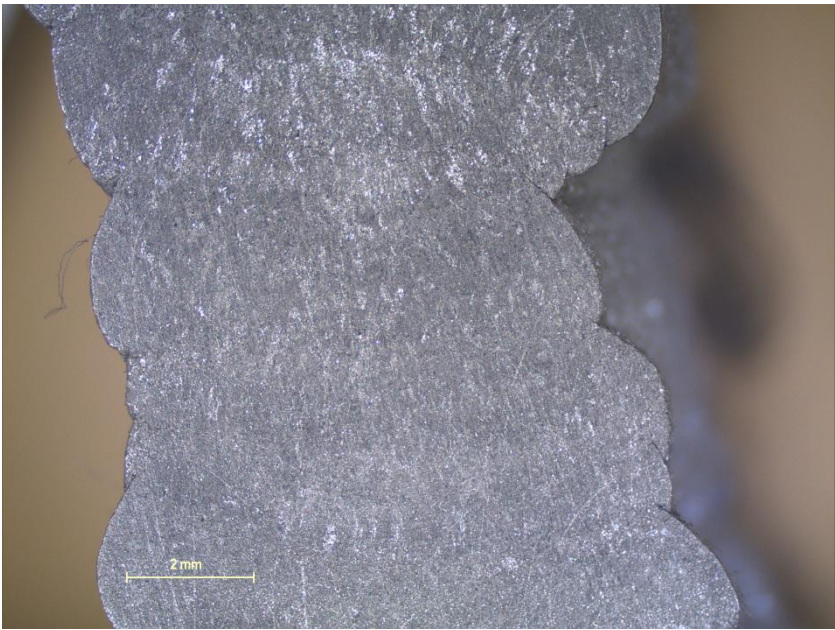
Tablica 16. Makroanaliza uzorka 1

<p>Zona utjecaja topline i linija protaljivanja, x10</p>	
<p>Sredina uzorka, x10</p>	

Tablica 17. Makroanaliza uzorka 2

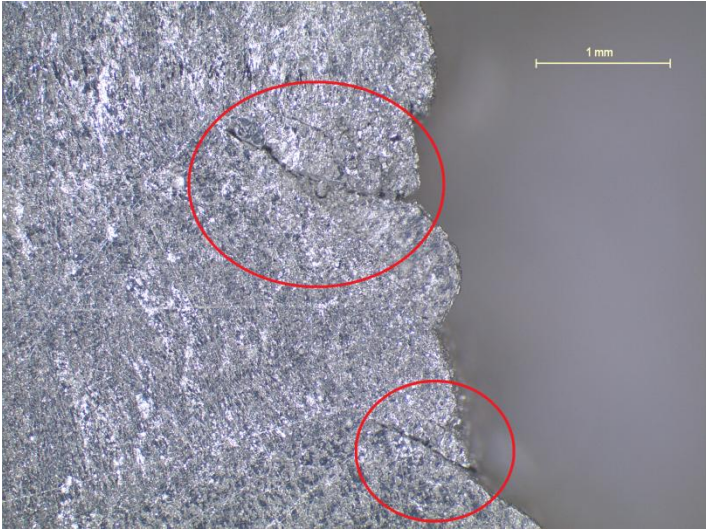

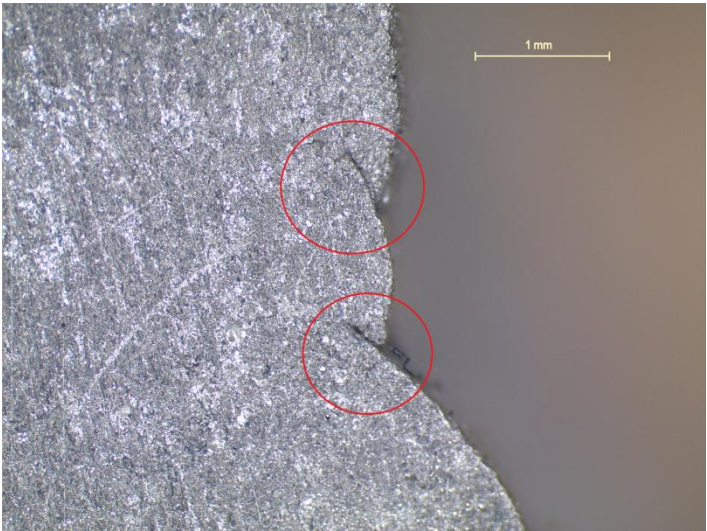
<p>Zona utjecaja topline i linija protaljivanja, x10</p>	
<p>Sredina uzorka, x10</p>	

Tablica 18. Makroanaliza uzorka 3

<p>Zona utjecaja topline i linija protaljivanja, x10</p>	
<p>Sredina uzorka, x10</p>	

U tablici 19. prikazane su nepravilnosti na rubovima uzorka. Slike su snimljene mikroskopom Leica MZ6. Povećanje mikroskopa je 25 puta. Na slikama u tablici 19. prikazani su ti naliježljivi rubovi slojeva dužine od 0,5 mm pa sve do preko 1 mm u prvom uzorku.

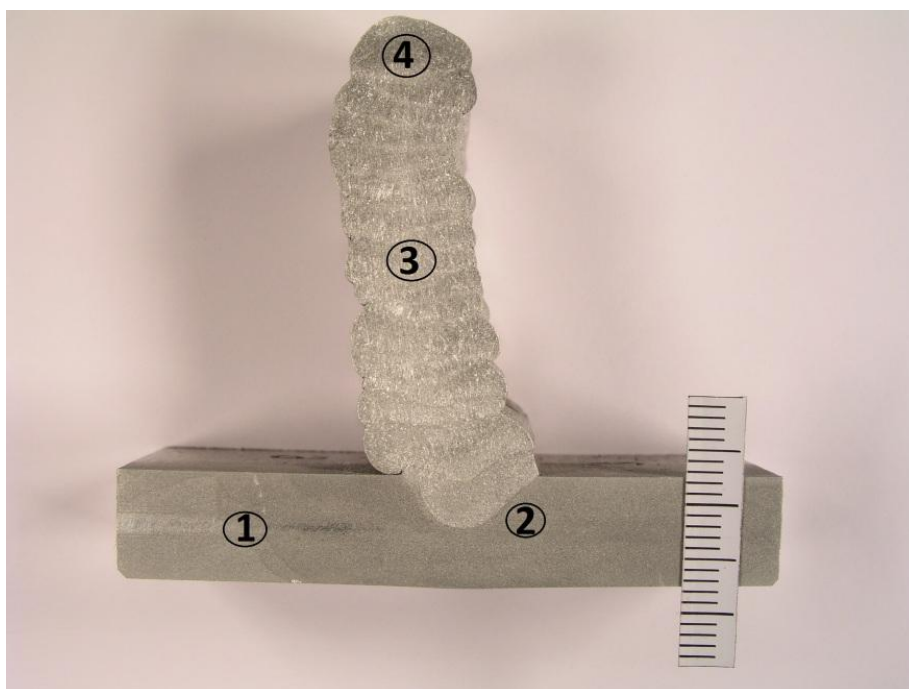
Tablica 19. Nepravilnosti na rubovima uzorka

<p>Uzorak 1, x25</p>	
<p>Uzorak 2, x25</p>	
<p>Uzorak 3, x25</p>	

Mikroanaliza uzoraka

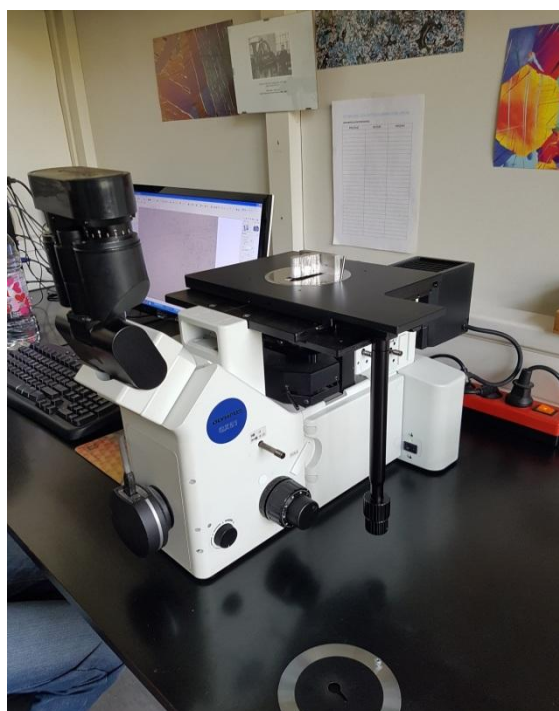
S obzirom da je zadatak eksperimentalnog rada ispitivanje mikrostrukture uzorka dobivenog WAAM postupkom, na uzorcima je analizirana mikrostruktura na 4 mjesta: osnovni materijal, zona utjecaja topline (ZUT), sredina uzorka i zadnji prolaz.

Na ovaj način postoji uvid u stanje osnovnog materijala, stanje osnovnog materijala nakon zavarivanja, odnosno zona utjecaja topline i stanje uzorka. Ovim pristupom uzimanja uzoraka mikrostrukture pokušali su se analizom uzeti u obzir mikrostrukture svih prolaza zavarivanja, dakle od prvog prolaza pa do završnog prolaza, uključujući i zonu utjecaja topline koja je specifična i različita od samog metala zavara.



Slika 46. Prilaz pozicija za mikrostrukturnu analizu

Na slici 46. prikazane su pozicije na kojima je slikana mikrostruktura na svakom uzorku. Analiza mikrostrukture provedena je na uređaju OLYMPUS GX51 prikazanom na slici 47., softverski program korišten za analizu slika je analySIS.



Slika 47. Mikroskop Olympus GX51



Slika 48. Mikrostruktura osnovnog materijala EN AW 5083

Na slici 48. prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala, aluminijeve legure EN AW 5083. Povećanje mikroskopa je 200 puta. Na slici se vide uključci u osnovnom materijalu. Prosječna veličina uključka je 10,6 μm .

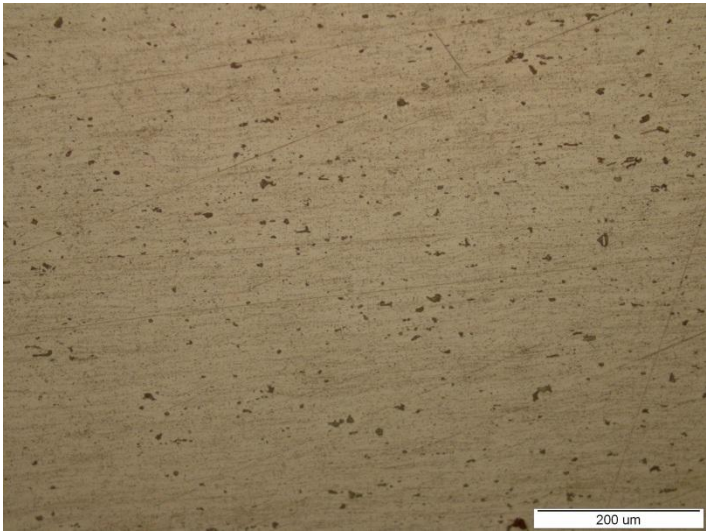
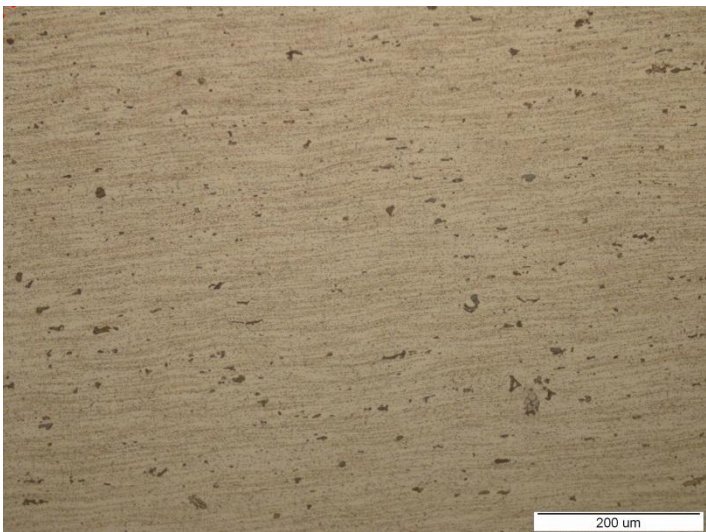

Mjesta ispunjena stlačenim plinom u metalu zavora nazivaju se poroznost. Veličine su im različite, od mikroskopskih do onih koji dosežu i nekoliko milimetara. Metal u rastaljenom stanju može upiti znatne količine plinova što uzrokuje nastajanje poroznosti u zavoru. Tijekom hlađenja taline plinovi u obliku mjehurića naglo izranjaju, međutim postoji mogućnost da je brzina skrućivanja veća od brzine izlučivanja plinova, koji ostaju zarobljeni u zavoru. Izlazeći iz zavora plinski mjehurići ponekad ostavljaju vidljive šupljine na površini zavora. Veličine i oblici šupljih mjesta ovise o količini upijenog, odnosno izlučenog plina iz taline metala zavora i brzine skrućivanja.

U tablici 20. prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline na svim uzorcima. Povećanje mikroskopa Olympus GX51 na slikama je 200 puta. Veličina uključaka je izmjerena programom analySIS u svim uzorcima. Za uzorak 1 prosječna veličina uključka iznosi 13,8 μm , za uzorak 2 prosječna veličina uključka iznosi 11,5 μm , a za uzorak 3 prosječna veličina uključaka iznosi 12,3 μm .

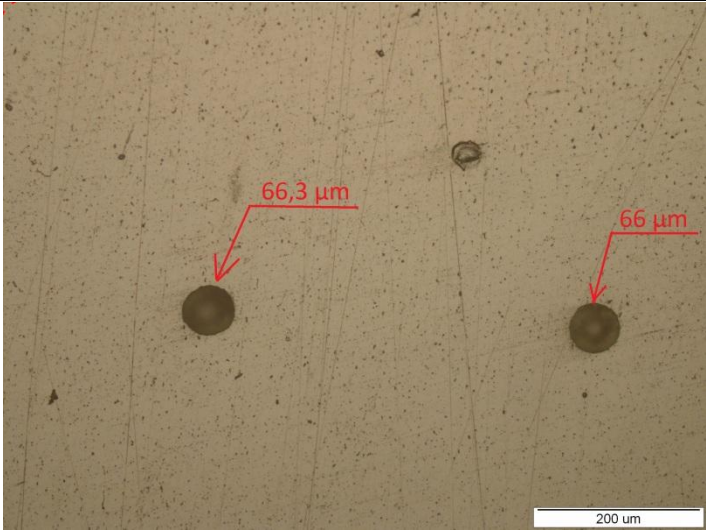
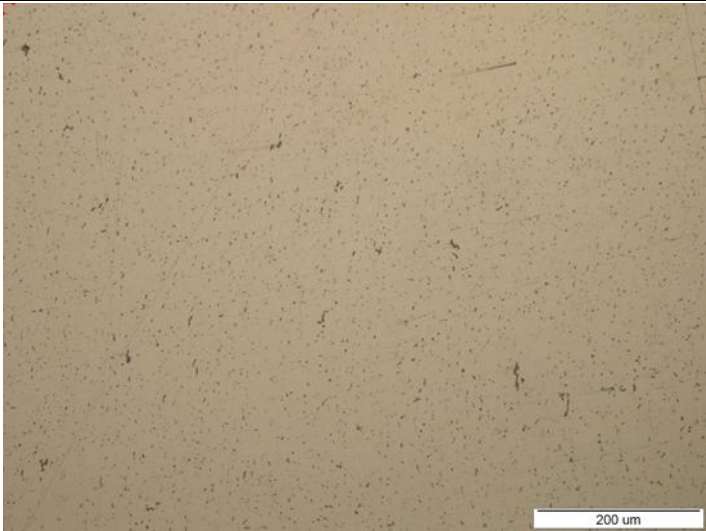
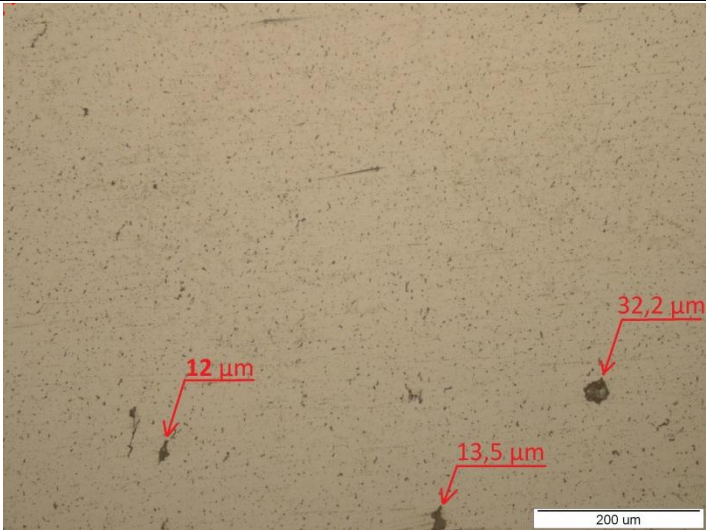
U tablici 21. prikazana je mikrostruktura na sredini uzorka. Prikazana je veličina uključaka u uzorku. Na slikama se vidi da su ukljucci najvećeg promjera u uzorku 1, uzorak 2 na slikanom dijelu nema većih uključaka nastalih nemogućnošću vodika da napusti strukturu tijekom skrućivanja.

U tablici 22. prikazana je mikrostruktura i promjer uključaka na vrhu uzorka. Najveći ukljucci su u uzorku 3, ali u ostatku mikrostrukture nema ostalih većih uključaka. U uzorcima 1 i 2 izmjereni ukljucci su manjeg promjera, ali ima više manjih uključaka.

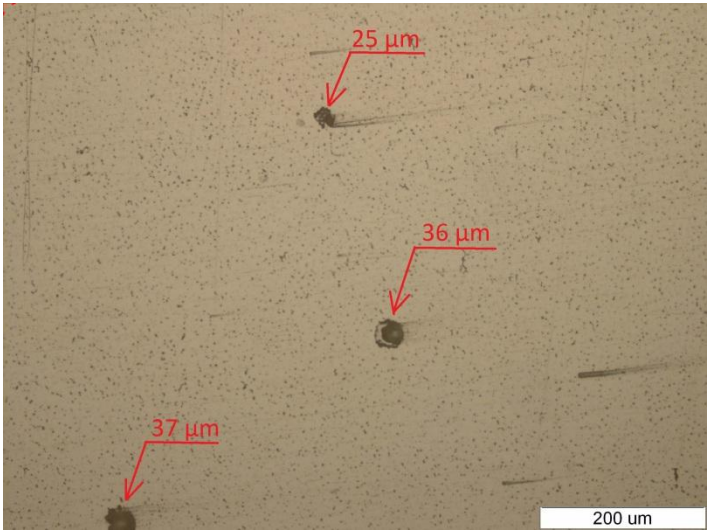
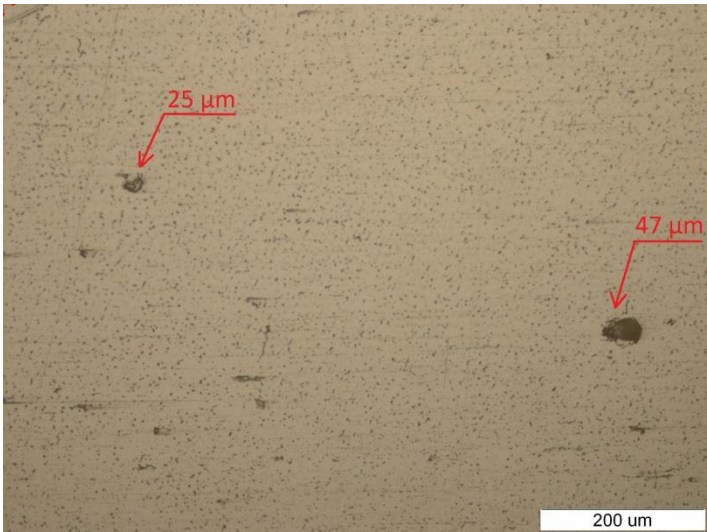
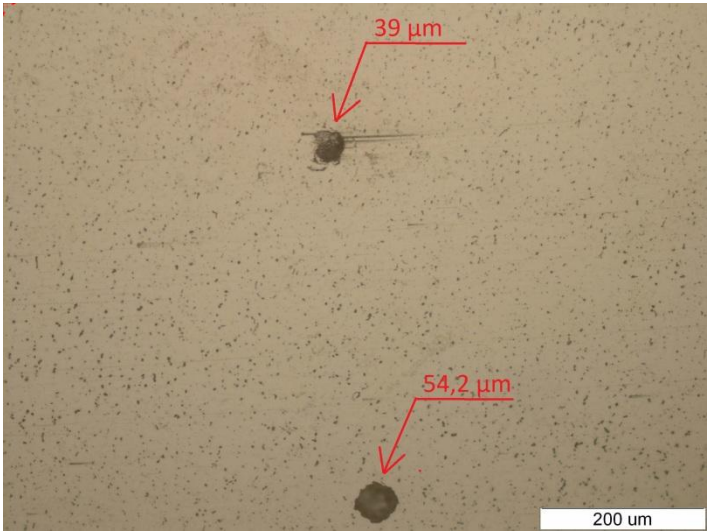
Tablica 20. Mikrostruktura i prosječna veličina uključka u zoni utjecaja topline

<p>Uzorak 1, x200, prosječna veličina uključka = 13,8 μm</p>	
<p>Uzorak 2, x200, prosječna veličina uključka = 11,5 μm</p>	
<p>Uzorak 3, x200, prosječna veličina uključka = 12,3 μm</p>	

Tablica 21. Snimljena mikrostruktura na sredini uzorka

<p>Uzorak 1, x200</p>	
<p>Uzorak 2, x200</p>	
<p>Uzorak 3, x200</p>	

Tablica 22. Snimljena mikrostruktura na vrhu uzorka

<p>Uzorak 1, x200</p>	
<p>Uzorak 2, x200</p>	
<p>Uzorak 3, x200</p>	

9. ZAKLJUČAK

Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnu električnim lukom i žicom (WAAM) ne spada u najnovije ideje među tehnologijama zavarivanja, ali razvojem i padom cijena robota i CNC strojeva užurbano se razvija u mnogim laboratorijima za primjenu u industriji. WAAM postupak omogućava izradu dijelova s minimalnim troškovima naknadne obrade odvajanjem čestica i uštedom materijala. Takav princip omogućava ogromne uštede u cijeni izrade skupljih materijala koji nisu pogodni za klasične postupke zavarivanja i ubrzano troše alate za obradu odvajanjem čestica. Tehnologija još uvijek nije učestala u industriji, ali s razvojem strojeva u koje su integrirani izvor struje i obrada odvajanjem čestica sa zaštitnom atmosferom, sigurno će imati svoj udio.

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno definirati primjenjive parametre MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Eksperiment je proveden na 3 uzorka s impulsnim strujama u kojima je promjenjivi parametar frekvencija impulsa i iznosi 6, 9 i 12 Hz. Uzorci su podvrgnuti mikroanalizi i makroanalizi s ciljem otkrivanja pora i pukotina.

Uzorcima je mjerena visina nakon svakog prolaza s obzirom da je cilj postići što veću visinu uz što manji broj prolaza. Na uzorku 1 postignuta je visina od 39,2 mm, na uzorku 2 visina od 40,8 mm, a na uzorku 3 visina od 39,5 mm, iz čega proizlazi da su se parametri korišteni na uzorku 2 uz frekvenciju od 12 Hz pokazali najboljima od parametara korištenih u eksperimentu.

Analizom makrostrukture i mikrostrukture dobiveni su idući rezultati:

- Vizualnom kontrolom uzoraka 2 i 3 vidi se nakošenost koja nije predviđena eksperimentom, te se preporučuje čvršći i precizniji sustav navođenja pištolja za zavarivanje.
- Na snimkama makrostrukture ne vide se uključci unutar uzorka, na rubovima svih uzoraka je došlo do naljepljivanja uslijed razlijevanja taline. Ta pojava ne predstavlja veću nepravilnost zbog naknadnog uklanjanja valovitosti u kojoj se nalazi i zona naljepljivanja.

- Analizom mikrostrukture u zoni utjecaja topline nije utvrđeno veće odstupanje između uzoraka.
- Analizom mikrostrukture na središnjem dijelu uzoraka primijećeni su uključci na uzorcima 1 i 3. Na uzorku 2 nema uključaka većih od 10 μm vidljivih na snimci te se parametri korišteni na tom uzorku smatraju optimalnima (frekvencija – 12 Hz).
- Analiza mikrostrukture na vrhu uzoraka ne prikazuje veća odstupanja između uzoraka. Svi uzorci imaju uključke sličnih veličina.
- Pri unostu topline od 3,1 kJ/mm ustanovljeno je da su dobivena mikrostrukturna svojstva najbolja te da su korišteni parametri optimalni za WAAM postupak.

Pregledom dobivenih mikrostrukture i makrostrukture za primjenjive parametre MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom predlažu se parametri korišteni za uzorak 2. Taj uzorak nema vidljivih makrostrukturnih pora niti pukotina u unutrašnjosti, a ima i manji broj uključaka većih od 10 μm na dobivenim mikrostrukturama u odnosu na ostala dva uzorka. S obzirom da je i najveća prosječna visina također postignuta na uzorku 2, dolazi se do zaključka da su parametri korišteni za taj uzorak najprikladniji za WAAM postupak aluminija.

LITERATURA

- [1] T. Wohlers, T. Gornet: "History of additive manufacturing"; 2014.
<http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> ; dostupno 14.06.2016.
- [2] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker; "Additive Manufacturing Technologies"; Springer; 2010.
- [3] M. Filomeno; prezentacija: "Wire+Arc Additive Manufacturing: properties, cost, parts"; Cranfield University; https://conferences.ncl.ac.uk/additivemx/ponencias/Filomeno_Martina_Mexico_short.pdf; dostupno 25.06.2016.
- [4] <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>; dostupno 03.11.2016.
- [5] https://www.researchgate.net/figure/269836411_fig3_Figure-3-Schematic-overview-of-selective-laser-melting-SLM-cycle; dostupno 03.11.2016.
- [6] <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>.; dostupno 03.11.2016.
- [7] <https://encryptedtbn1.gstatic.com>; dostupno 03.11.2016.
- [8] <http://www.joiningtech.com/services/laser-additive-manufacturing/>; dostupno 03.11.2016.
- [9] M. Šercer, B. Jerbić, T. Filetin; prezentacija; "Brza izgradnja prototipova i alata"; 2008; https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604179-0-pred2.pdf; dostupno 05.11.2016.
- [10] <https://i.ytimg.com/vi/IUIpa3AgNg/hqdefault.jpg>; dostupno 05.11.2016.
- [11] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li; "Wire-feed additive manufacturing of metal components technologies, developments and future interests"; Springer; 2015.
- [12] https://www.mathworks.com/cmsimages/66707_wl_nasa26016_fig6_wl.jpg; dostupno 05.11.2016.
- [13] <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf>; dostupno 05.11.2016.
- [14] S.Kralj; Skripta za učenje; "Zavarivanje I"; FSB.
- [15] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/2.%20RAD.pdf>; dostupno 05.11.2016.

- [16] M. Gojić; "Tehnike spajanja i razdvajanja materijala", Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [17] <http://www.sidexsideworld.com/threads/mig-welding-process-overview.23305/>; dostupno 06.11.2016.
- [18] <http://www.fronius.com/>; dostupno 15.11.2016.
- [19] M. Horvat, V. Kondić; Stručni članak; "PRIMJERI MODIFICIRANIH POSTUPAKA MIG/MAG ZAVARIVANJA"; 2012.
- [20] D. Delač; Završni rad: "Klasifikacija postupaka zavarivanja prema HRN EN ISO 4063"; FSB; Zagreb, 2012.
- [21] M. Rudan; 5. Seminar DTZI, "MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova", Pula, 2008.
- [22] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove; "Wire+Arc Additive Manufacturing"; Materials Science and Technology; 2016.
- [23] P. M. SEQUEIRA ALMEIDA; Doktorski rad: "PROCESS CONTROL AND DEVELOPMENT IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING"; Cranfield University; 2012.
- [24] J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell; "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V"; ELSEVIER; 2016.
- [25] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/index.html>; dostupno 15.11.2016.
- [26] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof; "Svojstva i primjena materijala"; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2006.
- [27] www.metalmates.com; dostupno 15.11.2016.
- [28] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf>; dostupno 15.11.2016.
- [29] G. Mathers; "The welding of aluminium and its alloys"; Woodhead Publishing Ltd.; Cambridge; England; 2002
- [30] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf dostupno 21.06.2016
- [31] ASM Handbook; Vol.6; Welding, Brazing, and Soldering; ASM International; 1993.

- [32] <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>; dostupno 05.11.2016.
- [33] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641>; dostupno 05.11.2016.
- [34] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>; dostupno 05.11.2016.
- [35] M. Filomeno, S.W. Williamns; Izvještaj: “Wire+Arc Additive Manufacturing vs traditional machining from solid”; Cranfield University; 2015.
- [36] D. Dong-Hong, P. Zeng-Xi, C. Dominic, L. Hui-Jun; “ Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing”; Wollongong University; 2014.
- [37] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2585>; dostupno 15.11.2016.
- [38] <http://www.eurocardis.com/hojastecnicas/hilosaluminio/OKAutrod5183.pdf>; dostupno 15.11.2016.
- [39] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5083H116>; dostupno 16.11.2016.